

VŠB- TECHNICKÁ UNIVERZITA OSTRAVA
Fakulta elektroniky a informatiky
Katedra elektroniky



Řídicí jednotka reverzibilního DC/DC měniče

Control Unit of Reversible DC/DC Converter

Zadání diplomové práce

Student:

Bc. Michal Chudárek

Studijní program:

N2649 Elektrotechnika

Studijní obor:

2612T015 Elektronika

Téma:

Řídicí jednotka reverzibilního DC/DC měniče
Control Unit of Reversible DC/DC Converter

Zásady pro vypracování:

1. Analyzujte a zhodnoťte současný stav a možnosti technických prostředků pro řízení polovodičových měničů v oblasti DC/DC měničů většího výkonu a spínacího kmitočtu.
2. Navrhněte vhodné řešení řídicí jednotky pro DC/DC měnič s obousměrným přenosem energie.
3. Pro vybrané řešení zpracujte řídicí program a implementujte jej do navrženého hardware.
4. Ověřte funkci zpracovaného řešení na laboratorním vzorku řídicí jednotky, příp. dle pokynů vedoucího diplomové práce na laboratorním modelu celého měniče.

Seznam doporučené odborné literatury:

Krejčířík, A.: Moderní spínané zdroje, BEN-Technická literatura, 2010, ISBN 978-80-7300-303-6

Vondrášek, F.: Výkonová elektronika-měniče s vlastní komutací a bez komutace, svazek 3, Plzeň 2003, ISBN 80-7082-980-X

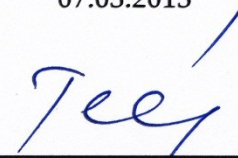
Další literatura dle pokynů vedoucího diplomové práce.

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

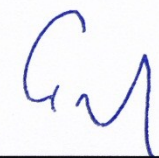
Vedoucí diplomové práce: **prof. Ing. Petr Chlebiš, CSc.**

Datum zadání: 01.09.2014

Datum odevzdání: 07.05.2015


doc. Ing. Petr Palacký, Ph.D.
vedoucí katedry




prof. RNDr. Václav Snášel, CSc.
děkan fakulty

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně. Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.

V Ostravě, dne 7.5.2015

Podpis:.....

Poděkování

Především chci poděkovat vedoucímu mé diplomové práce panu prof. Ing. Petru Chlebišovi, CSc. za poskytnuté informace a odbornou pomoc, kterou mi byl ochoten poskytnout. Dále chci poděkovat panu Ing. Aleši Havlovi, Ph.D. za podnětné rady při realizaci.

Další poděkování patří rodičům za jejich neustálou podporu, kterou mi poskytli během mého dosavadního studia.

Abstrakt

Předmětem této diplomové práce je navrhnout řídicí jednotku pro reverzibilní DC/DC měnič. Tato řídicí jednotka musí být schopna pracovat s vyššími spínacími kmitočty v řádu desítek kHz. Musí být konstruována tak, aby mohla provádět složité výpočty, zpracovávat signály z analogového prostředí a také zajistit komunikaci s nadřazeným systémem pro diagnostiku či ovládání. Nezbytnou součástí řídicí jednotky je implementace algoritmu řízení pro daný typ měniče. V mém případě je to reverzibilní DC/DC měnič, který dokáže přenášet energii v obou směrech. Cílem práce je ověřit funkčnost algoritmu řízení na realizovaném vzorku reverzibilního DC/DC měniče.

Abstract

The purpose of this dissertation work is to design a control unit for reversible DC/DC converter. This control unit must be able to operate at higher switching frequencies of tens of kHz. It must be designed so that it can perform complicated calculations, process signals from analog surrounding and it must also ensure communication with the superior system for diagnostics or controlling. An essential part of the control unit is implementation of the control algorithm for a certain type of converter. In my case it is a reversible DC/DC converter which transfers energy in either direction. Aim of this thesis is to verify the functionality of the control algorithm implemented on a sample of reversible DC/DC converter.

Klíčová slova

DSC - Digitální signálový kontrolér, **CCS** - Code Composer studio, **BDC** - Obousměrný DC/DC měnič

Keyword

DSC - Digital signal controller, **CCS** - Code Composer studio, **BDC** - Bidirectional DC/DC converter

Seznam použitých symbolů

Symbol	Jednotka	Význam
U_{TRA}	[V]	Napětí na primárním vinutí VF transformátoru
U_{TRB}	[V]	Napětí na sekundárním vinutí VF transformátoru
U_A	[V]	Napětí zdroje napětí pro měnič A
U_B	[V]	Napětí zdroje napětí pro měnič B
U_{LK}	[V]	Napětí na rozptylové indukčnosti
I_{TRA}	[A]	Proud tekoucí primárním vinutím VF transformátoru
I_{TRB}	[A]	Proud tekoucí sekundárním vinutím VF transformátoru
I_{LK}	[A]	Proud tekoucí rozptylovou indukčností
I_{L1}	[A]	Proud tekoucí přes tlumivku na straně měniče B
I_{QX}	[A]	Proud tekoucí přes tranzistor. x index spínače
I_{DX}	[A]	Proud tekoucí přes diodu. x označuje číslo diody
L_k	[H]	Rozptylová indukčnost
L_1	[H]	Tlumivka na straně měniče B
L	[H]	Indukčnost
R	[Ω]	Odpor
T	[s]	Perioda
t	[s]	Čas
ϕ	[s]	Zpoždění signálu
ZI	[s]	Zpoždění spínacích pulzů
Q_x	[-]	Označení pro spínací prvky. x index spínače
D_x	[-]	Označení pro diody. x prezentuje číslo diody
z	[-]	Poměrná doba zapnutí

Seznam použitých zkratk

Zkratka	Anglický význam	Český význam
AC	Alternate Current	Střídavý proud
DC	Dirrect Current	Stejnoseměrný proud
BDC	Bidirectional DC converter	Obousměrný DC/DC měnič
IBDC	Isolate Bidirectional DC converter	Izolovaný obousměrný DC/DC měnič
DAB	Dual active bridge	Duální aktivní můstek
UPS	Uninterruptible power supply	Nepřerušitelný zdroj energie
ZVS	Zero voltage switching	Spínání při nulovém napětí
DSP	Digital Signal Procesor	Digitálním signálový procesor
A/D	Analog/Digital converter	Analogově digitální převodník
D/A	Digital/Analog converter	Digitálně analogový převodník
FFT	Fast Fourier Tranformation	Rychlá Fourierova transformace
FPGA	Field Programmable Gate Array	Programovatelné hradlové pole
CCS	Code Composer Studio	Code Composer Studio
ALU	Arithmetic logic unit	Aritmeticko-logické jednotky
MAC	Multiplier Accumulator	Akumulátor
IIR	Infinite Impulse Response	Nekonečná impulsová odezva
FIR	Finite Impulse Response	Konečná impulsová odezva
RISC	Reduce Instruction Set Computer	Redukovaná instrukční sada
CISC	Complex Instruction Set Computer	Kompletní instrukční sada
PLL	Phase Locked Loop	Fázový závěs
DLL	Delay Locked Loop	-
MMACS	Million Multiply Accumulates per Second	Milion akumulací za sekundu
SARAM	Sequential Access and RAM	Sekvenční paměť RAM
PWM	Pulse Wide Modulation	Pulzně šířková modulace
VF	High frequency transformer	Vysokofrekvenční transformátor
PROM	Programmable Read only memory	Programovatelná paměť ROM
NAND	Logic gate „Not“ AND	Logické hradlo NAND
IOB	Input Output Block	Vstupně Výstupní Block
LB	Logic Block	Logická buňka
IGBT	Insulated Gabe Bipolar Tranzistor	Bipolární tranzistor s izolovaným hradlem
OZ	Operational Amplifier	Operační zesilovač

Obsah

1. Úvod.....	9
2. Analýza topologií a prostředků pro řízení reverzibilních DC/DC měničů.....	10
2.1 Izolované obousměrné DC/DC měniče (IBDC).....	10
2.2 Základní topologie duálního aktivního můstku (DAB).....	11
2.3 Prostředky pro řízení reverzibilních měničů	13
2.3.1 Digitální signálové procesory.....	13
2.3.2 Programovatelné hradlové pole FPGA.....	15
3. Teorie pro návrh řídicí jednotky reverzibilního DC/DC měniče.....	17
3.1 Topologie semi-maticového duálního aktivního můstku(SM –DAB)	17
3.2 Analýza řídicích taktů pro přenos energie ze strany A na stranu B	18
3.2.1 Popis spínacího diagramu při přenosu energie A-B	20
3.3 Analýza řídicích taktů pro přenos energie ze strany B na stranu A	22
3.3.1 Popis spínacího diagramu při přenosu energie B-A	25
3.4 Algoritmus řízení	26
4. Simulace reverzibilního DC/DC měniče.....	27
4.1 Simulace přenosu energie ze strany A na B	27
4.1 Simulace přenosu energie ze strany B na A	29
5. Návrh řídicího systému reverzibilního DC/DC měniče	32
5.1 Digitální signálový mikrokontrolér TMS320F28335.....	33
5.2 Obvody pro napájení mikrokontroléru a hardwarových periférií.....	34
5.3 Digitální obvody.....	35
5.4 Analogové obvody	36
6. Realizace fyzikálního vzorku	38
6.1 Prostředí pro programování mikrokontroléru.....	38
6.2 Nadřazený systém pro ovládání	39
6.3 Ověření funkčnosti algoritmu pro přenos energie A-B	41
6.4 Ověření funkčnosti algoritmu pro přenos energie B-A	42
7. Závěr	43
8. Literatura	44

1. Úvod

V dnešní době vyspělých technologií jsou kladeny čím dál větší nároky na kvalitu a účinnost zařízení. Materiálové inženýrství 21. století umožňuje vytvářet velice specifické polovodičové materiály, např. SiC nebo GaN. Tyto technologie se neustále vylepšují a umožňují tak, že v našem oboru výkonové elektroniky dosahujeme lepších výsledků. Lepšími výsledky se myslí vyšší spínací kmitočty a menší spínací ztráty. Tím v důsledku dosáhneme větší účinnosti celého zařízení.

S rozvíjejícím se trendem alternativních zdrojů energie je zapotřebí vyvíjet speciální topologie měničů pro přeměnu energie z rozdílných napětových hladin. Už v roce 1991 byla představena základní topologie určená k obousměrnému toku energie. Topologie je známa pod názvem „Dual Active Bridge“, v překladu Duální aktivní můstek (DAB). DAB je základním kamenem pro všechny modifikace izolovaných reverzibilních měničů. Práce je určena k analýze možnosti řízení speciální topologie duálního aktivního můstku s maticovým měničem proudového typu.

Diplomová práce je rozložena do 8 kapitol, v nichž se pojednává o izolovaných reverzibilních měničích.

Kapitola 2: Analýza topologií a prostředků pro řízení reverzibilních DC/DC měničů

Základní specifikace myšlenky obousměrných měničů a prostředků pro řízení.

Kapitola 3: Teorie pro návrh řídicí jednotky reverzibilního DC/DC měniče

Obsahuje návrh algoritmů spínání pro přenos energie v obou směrech.

Kapitola 4: Simulace reverzibilního DC/DC měniče

Kapitola podporující teoretický základ.

Kapitola 5: Návrh řídicího systému reverzibilního DC/DC měniče

Kapitola určená pro výběr potřebných periférií k řízení reverzibilního měniče.

Kapitola 6: Realizace fyzikálního vzorku

Kapitola popisující postupy a naměřené výsledky při realizaci.

Kapitola 7: Závěr

2. Analýza topologií a prostředků pro řízení reverzibilních DC/DC měničů

Reverzibilní DC/DC měniče též známe z anglické literatury jako „Bidirectional DC/DC converter“. Jsou speciálním druhem měničů, poskytující oddělení dvou různých napěťových úrovní a vysokou účinnost přesahující 90 %. Posledních pár let se těmto měničům začala věnovat velká pozornost z důvodu využití obnovitelných zdrojů energie. Vzhledem k rostoucím energetickým potřebám celé populace se inženýři snaží stavět efektivní systémy s velkou účinností. Vysoké efektivity celého zařízení se docílí právě tím, že zařízení je schopno využít přebytečnou energii. Ve většině aplikací je tedy nutné mít jakési úložiště energie, například baterii či superkondenzátor.

Kombinace těchto dvou elementů je však nejefektivnější. Superkondenzátor slouží jako část obvodu pro rychlou absorpci špičkově dodané energie a baterie pro dlouhodobé ukládání či čerpaní energie. Společné zapojení těchto prvků je tak schopno zachovat nezvlněný průběh napětí pro zátěž. Pro spojení takových obvodů je zapotřebí právě obousměrných DC/DC měničů. Typickým příkladem těchto měničů jsou systémy, které využívají několik obnovitelných zdrojů energie. Mezi základní zástupce obnovitelných zdrojů energie patří vodní, fotovoltaické a větrné elektrárny. Tyto elektrárny však nejsou schopny dodávat stálý a pravidelný výkon do zátěže. Tedy je nutné výkon do zátěže regulovat, a k tomu slouží tento typ měničů. [1,2]

Rozdělení BDC obsahuje dva základní typy: **Izolované obousměrné měniče**

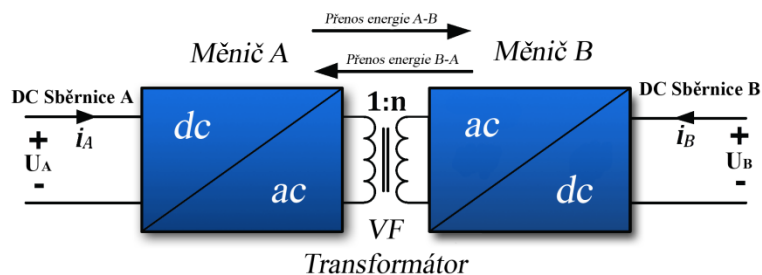
Neizolované stejnosměrné měniče

2.1 Izolované obousměrné DC/DC měniče (IBDC)

Při konstrukci multi-souce zařízení je kladen velký důraz na kvalitní galvanické oddělení. Toto oddělení je nezbytně nutné pro personální bezpečnost, odstranění šumu a hlavně dovoluje spojení několika různých napěťových úrovní do jedné společné sběrnice. Galvanické oddělení je vytvořeno pomocí vysokofrekvenčního transformátoru. Tyto měniče musí fungovat na poměrně vysokých kmitočtech tak, aby transformátor nebyl zbytečně velkých rozměrů.

Tyto měniče jsou velice podobné jednosměrným DC-DC měničům, avšak opak je pravdou. Obousměrný tok energie významně přispívá ke složitosti celého systému. V dnešní době, kdy mikropočítače mají velký výpočetní výkon, je vhodné do řízení zařadit i soft-switching metody. Tyto metody výrazně zvyšují účinnost celého zařízení. Práce je zaměřena především na vybrané typy IBDC: - DAB Dual Active Bridge

- S-DAB Semi Dual Active Bridge
- SRC Series Resonant Converter
- SM - DAB Semi-Matrix Dual Active Bridge
- DHB Dual Half Bridge [1,2]

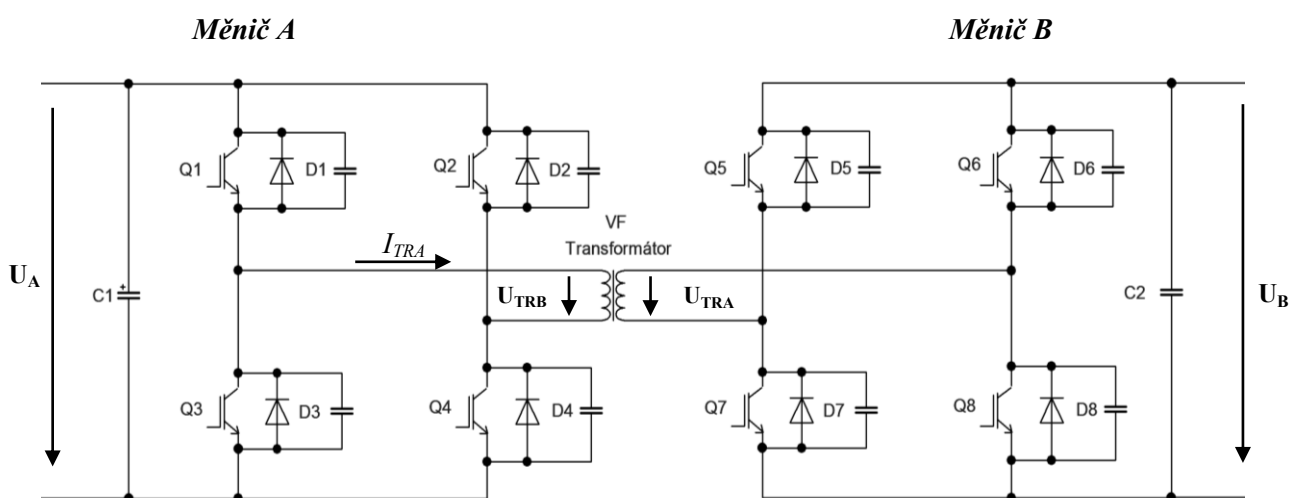


Obr. č. 2.1 Blokové schéma koncepce obousměrných DC/DC měničů [1]

2.2 Základní topologie duálního aktivního můstku (DAB)

Schéma této topologie využívá dva jednofázové DC/AC měniče, jež jsou umístěny tak, aby výstupní strany jednofázového střídače „AC“ byly spojeny pomocí vysokofrekvenčního transformátoru. Spojení AC/AC je složeno z induktivních a kapacitních komponent tak, aby se co nejvíce omezila stejnosměrná složka napětí a AC Ripple Current. Funkce celého měniče spočívá v tom, že při správném řízení dokáže měnič určit směr toku energie přes společnou indukčnost (transformátor). Přenos energie přes indukčnost je spjatý se změnou střídavé složky proudu na primární a sekundární straně vinutí. Změna střídavé složky je způsobena daným typem řízení.

U řízení těchto měničů je velice důležitý parametr L_K . Rozptylová indukčnost L_K v podstatě udává, jaký maximální výkon bude moci být přenesen s danou spínací frekvencí. Tato indukčnost má za důsledek zpoždění signálu napětí na transformátu. Toto zpoždění však není překážkou při správném časování řídicích taktů. Zpoždění ϕ je závislé na směru toku energie. Pokud proudí energie z měniče A do měniče B, zpoždění ϕ nabývá kladných hodnot. Druhý případ je, když měnič B dodává energii do měniče A. Pak úhel ϕ nabývá záporných hodnot. Základní řízení této topologie je zobrazeno na obrázcích 2.3 a 2. 4. [2,3]



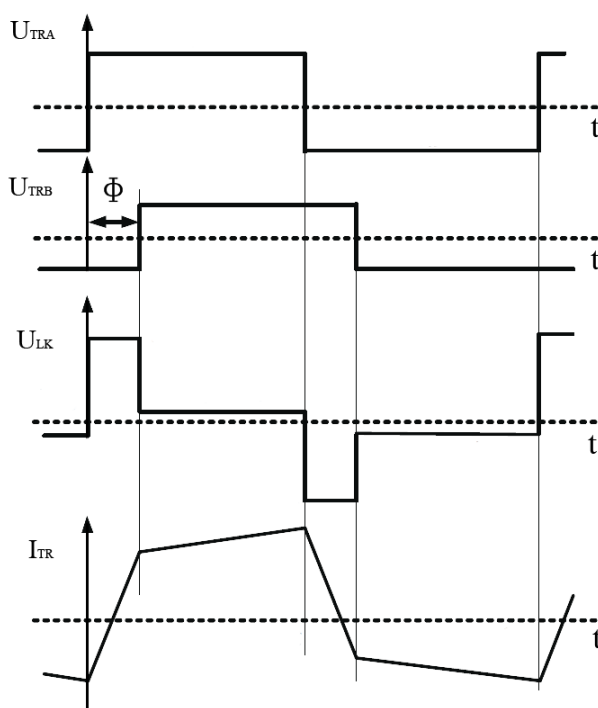
Obr. č. 2.2: Schéma zapojení duálního aktivního můstku [3]

Obdélníkové řízení - Při obdélníkovém módu řízení je nutné používat střidu pracovního cyklu 1:1 z napětí na primární a sekundární straně vinutí. Tento poměr nám dovoluje využít daný typ měniče pro maximální možný přenositelný výkon. Pro dosažení spínání při nulovém napětí (ZVS) musíme dodržet definované meze fázového posunu ϕ mezi napětím primární a sekundární strany vinutí. Kromě toho okamžité hodnoty proudů na tranzistorech, které se vyskytují v průběhu spínacích taktů, nemohou být přesně kontrolovány. Proto pro primární stranu obousměrného měniče platí, že při zachování nízkého proudu v průběhu sepnutí tranzistorů omezíme ztráty způsobené vedením. Z poslední uvedené podmínky je jasné, že tento způsob řízení není vhodný pro tento typ obousměrného DC/DC měniče. [3]

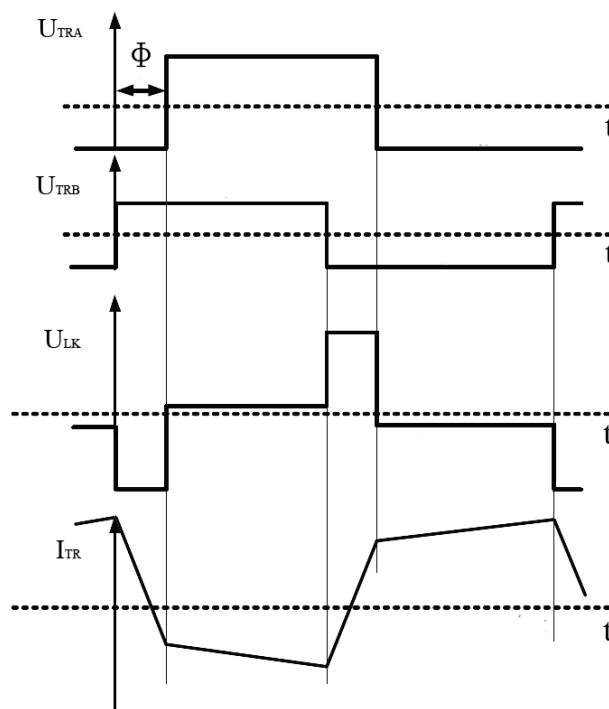
Trojúhelníkové řízení – v případě daného řízení platí stejné podmínky jako, u obdélníkového s tím, že při změně střidy na menší hodnotu jak 1:1 dosáhneme menších spínacích ztrát. [3]

Lichoběžníkové řízení - u tohoto typu řízení by měla být střida napětí primárního a sekundárního vinutí opět menší jak 50 %. [3]

V porovnání mezi těmito třemi metodami je nejvýhodnější použít lichoběžníkovou metodu. Díky této modulaci dosáhneme při dané topologii největšího množství přenesené energie. Celá implementace modulace závisí hlavně na optimalizaci středních hodnot špičkového proudu primárním vinutím. Tímto způsobem se udržuje hodnota výstupního napětí v požadovaném rozsahu U_A či U_B . [3]



Obr. č. 2.3: Průběhy při přenosu energie ze strany A na stranu B [1]

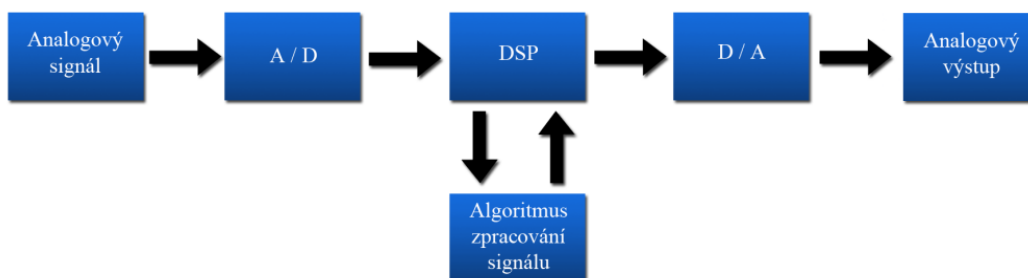


Obr. č. 2.4: Průběhy při přenosu energie ze strany B na stranu A [1]

2.3 Prostředky pro řízení reverzibilních měničů

2.3.1 Digitální signálové procesory

Digitální signálové procesory (dále jako DSP) jsou koncipovány pro rychlé zpracování aritmeticko-logických úloh, ke kterým patří násobení, dělení, sčítání, odčítání a v neposlední řadě rotace a přesouvání instrukcí. Tyto operace tvoří základ pro digitální zpracování signálu. Jako každá technologie si i DSP prošly jistým vývojem a díky neustálému zlepšování se tyto procesory využívají v nejrůznějších aplikacích. Mezi nejrozšířenější aplikaci DSP patří zcela jistě komunikace a přenos dat, ale využívají se i pro jiná odvětví, například průmyslové aplikace, lékařství, komerční elektronika atd. Na obrázku 2.5 můžeme vidět zjednodušené blokové schéma aplikace DSP. [4,5]



Obr. č. 2.5: Blokové schéma zpracování analogového signálu

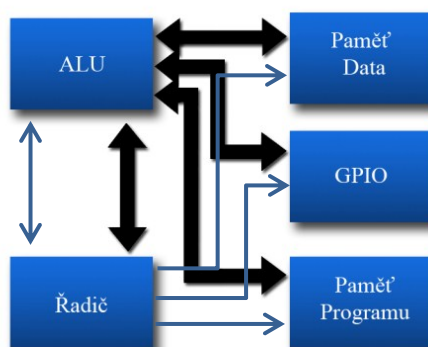
Blokové schéma znázorňuje typické použití DSP. Přizpůsobený analogový signál přivádíme na analogově-digitální převodník, který analogovou hodnotu převede na digitální. Po převodu procesor provede požadovaný algoritmus a výsledek zpracování dat je opět převeden na analogový signál pomocí digitálně-analogového převodníku. Algoritmus je přesné vyjádření postupu pro zadaný typ úlohy. U DSP jsou používány algoritmy pro číslicovou filtraci IIR FIR, konvoluci, korelaci, zpětnou a přímou diskretní transformaci a FFT „Rychlou Fourierovu transformaci“.

Pro řešení, kde systém vyžaduje řízení v reálném čase a obsahuje složité regulace a výpočty, jako je například FFT, je nutno použít právě DSP. Typickým příkladem z oboru výkonové elektroniky je použití procesoru pro regulaci otáček či momentu elektrických motorů. [4,5]

Architektura DSP

Architektura těchto procesorů je vystavěna zejména na harvardské architektuře. Výhodou je rozdělená paměť pro data a program. V praxi to znamená, že pro každou paměť je určena vlastní sběrnice, což umožňuje velkou propustnost dat. Ovšem rozdělením paměti výhody oproti Neumannově architektuře nekončí. Dalšího zrychlení výpočtu se dosahuje pomocí specializovaných kalkulačních jednotek procesoru, které dokáží pracovat simultánně s ostatními jednotkami.

Mezi výpočetní jednotky patří speciální aritmeticko-logické jednotky (dále jako ALU). Tato jednotka je známá pod názvem Multiplier Accumulator (dále jako MAC). Tuto jednotku tvoří hardwarová násobička využívající Boothova algoritmu nebo uniformních buněk. Při použití Boothova algoritmu je nutno aplikovat do procesoru střadač s rozšířeným počtem bitů, nejčastěji na dvojnásobek datového slova. ALU jednotka je také vybavena paralelními posuvnými registry. Tyto registry umožňují posun o více bitů v obou směrech. Při těchto metodách je nutné využít také pomocné registry, které slouží jako zápisníková paměť. Jednotka MAC je oproti klasické ALU navržena tak, aby dokázala v jednom taktu provést tyto operace: načtení hodnoty z registru, násobení hodnot z jiného registru, přičtení výsledku do akumulátoru, posun adresy prvního registru a posun adresy druhého registru. [4,5]



Obr. č. 2.6: Blokové schéma Harvardské architektury

Redukovaná instrukční sada RISC

RISC obsahuje redukovanou instrukční sadu v procesoru. Výběr instrukcí je založen na výzkumu četnosti nepoužívanějších instrukcí. Výrobci se snaží zaměřit hlavně na vysoce optimalizovanou sadu strojových instrukcí, která má za následek nižší cenu procesoru. Instrukce tohoto typu mají konstantní délku a neměnný formát. [6]

Kompletní instrukční sada CISC

Procesor je řízen instrukcemi různé délky s mnoha parametry, obsahuje modifikační bity, což jsou složité dekodéry instrukcí. Operandů instrukce jsou uloženy v registrech. Tyto operandy mají různou dobu provedení operace v závislosti na tom, kde je uložen operand. Realizace instrukce je v podstatě provedení mikroprogramu uloženého v paměti PROM. [6]

Rozdělení DSP

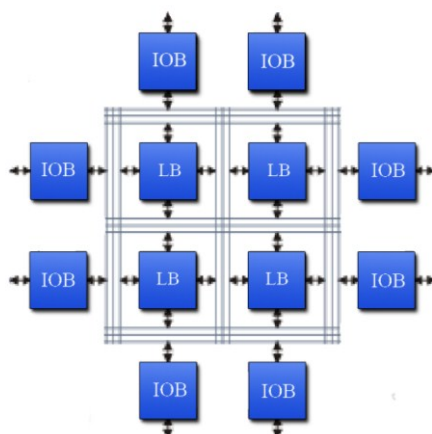
Procesory se dělí hlavně podle typu použité aritmetiky, šířky datové sběrnice a počtu fyzických jader.

- **Procesory s celočíselnou aritmetikou** mají velký nedostatek ve výpočtu reálných čísel. Procesor musí neustále převádět reálná čísla na čísla celá a jejich mezivýsledky se musí neustále normovat. Aplikace algoritmů jsou tak velice náročné. Často se používají pro sériovou výrobu z důvodu nízké ceny.
- **Procesory s pevnou řádovou čárkou**, jsou kompromis mezi plovoucí a celočíselnou aritmetikou. Bohužel u těchto procesorů se při aplikaci algoritmů setkáme s obdobným problémem, a to je normování.
- **Procesory s plovoucí řádovou čárkou** jsou procesory, které se s velkou oblibou používají hlavně pro výrazně jednodušší aplikaci softwaru. Norma popisující procesory s plovoucí řádovou čárkou se označuje IEEE 754.

2.3.2 Programovatelné hradlové pole FPGA

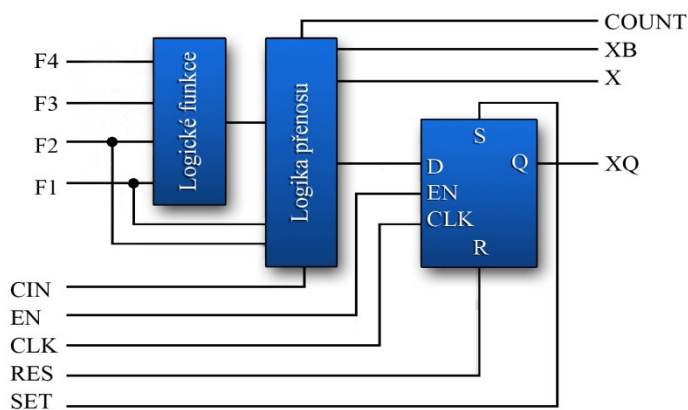
Obvody typu FPGA (Field Programmable Gate Array) mají z programovatelných obvodů nejobecnější strukturu a obsahují nejvíce logiky. Současné největší obvody FPGA obsahují až 6

milionů ekvivalentních hradel (typické dvou vstupové hradlo NAND). Typickou strukturu obvodu FPGA znázorňuje následující obrázek 2.7. [7]



Obr. č. 2.7: Blokové FPGA čipu

Bloky označené IOB (Input/Output Block) představují vstupně-výstupní obvody pro každý I/O pin FPGA. Bloky obvykle obsahují budič, multiplexer, registr a ochranné obvody. Bloky LB (Logic Block) představují vlastní programovatelné logické bloky. Všechny bloky mohou být různě propojeny globální propojovací maticí. Nejpoužívanější struktura konfigurovatelného logického bloku je znázorněna na následujícím obrázku č.2.8. [7]



Obr. č. 2.8: Schéma Logického bloku

FPGA mají možnost propojit některé signály logických bloků napřímo se sousedním blokem bez nutnosti využití globální propojovací matice. Tato topologie spojení má mnohem menší zpoždění a umožní tak realizovat rychlé obvody, což je nezbytné při sčítání či násobení bitového slova s druhým. Mimo bloků znázorněných na předchozích obrázcích integrují výrobci do FPGA další funkční moduly. Moderní FPGA obsahují několik bloků velmi rychlé synchronní paměti RAM. FPGA velmi často obsahují obvody, jako jsou PLL (Phase Locked Loop) nebo DLL (Delay Locked Loop). Tyto periferie slouží pro obnovení charakteristik hodinového signálu, případně pro násobení nebo dělení jeho frekvence. [7]

3. Teorie pro návrh řídicí jednotky reverzibilního DC/DC měniče

Při návrhu řídicí jednotky měniče se vždy musíme odrazit od požadavků na konkrétní sestavu. U tohoto měniče je požadavkem přenášet energii ze vstupu na výstup a naopak. Z toho plyne, že se jedná o soustavu dvou měničů, které jsou na sobě časově závislé. Vzhledem k časové závislosti a použité kombinaci zapojení je řízení výpočetně náročné, a to hned z několika důvodů. Vysoká spínací frekvence je prvním aspektem, který nejvíce ovlivňuje řízení a zatížení procesoru. Dále je s tím spojena analýza průběhů fyzikálních veličin v měniči, která se musí s každým spínacím cyklem provádět tak, aby nedošlo k poškození nebo úplnému zničení celého zařízení. Do analýzy patří velikost a směr proudu tekoucího do primárního a sekundárního vinutí, teplota a napětí na určených místech.

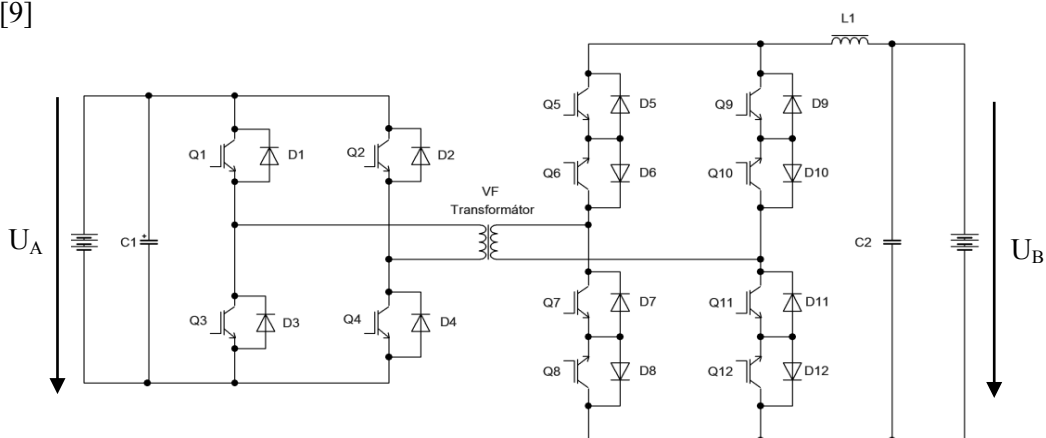
U maticového měniče je stěžejní udržet průtok proudu přes indukčnost „ LI “. V případě nedodržení této podmínky dojde k vysokému nárůstu napětí na spínacích prvcích. Toto vysoké napětí má za následek proražení tranzistoru, a tím dojde k jeho zničení. Další problematická oblast je určení nulového proudu v maticovém měniči pro určení časů sepnutí IGBT. Správné určení napětí na vstupní a výstupní straně bude mít také velký vliv na řízení. Všechny tyto funkce se musí neustále opakovat s vysokou spínací frekvencí, což vyžaduje nasazení výkonného mikropočítače. Pro spínací frekvence do 50 kHz by měl teoreticky stačit mikropočítač TMS320F28335 od firmy Texas Instruments. [8,9]

3.1 Topologie semi-maticového duálního aktivního můstku(SM –DAB)

Obousměrný DC/DC měnič umožňuje předávání energie z jedné strany na druhou a naopak. Schéma naznačené na obrázku 3.1 se skládá z H-můstku, maticového měniče a vysokofrekvenčního transformátoru. H-můstek má na svém vstupu kondenzátor pro vyhlazení napětí, na vstupu maticového měniče je kondenzátor a indukčnost $L1$. Tato strana má tedy charakter zdroje proudu. Jednotlivé spínače maticového měniče jsou řešeny antiseriovým zapojením IGBT tranzistorů. Diody brání opačnému směru toku proudu. Například při sepnutí tranzistoru $Q6$ teče proud přes diodu $D5$. Tato dioda pak brání toku proudu opačným směrem, pokud nesepneme tranzistor $Q5$. Transformátor má převod $1:n$ a slouží ke galvanickému oddělení. Poměr závitů se volí dle požadavků na daný typ aplikace.

Princip toku energie je následující: pokud chceme energii přenášet zleva doprava, tranzistory v H-můstku se spínají obdobně jako v jednofázovém střídači. Současně s tím se musí spínat určité kombinace spínačů v maticovém měniči. Pokud je například sepnuta kombinace tranzistorů $Q1$ a $Q4$, musí se zároveň sepnout kombinace tranzistorů $Q6$ a $Q12$ z maticového měniče. Při opačném směru toku energie stačí spínat tranzistory pouze v maticovém měniči a diody H-můstku proud usměrní. Obě části měniče fungují jako střídače a usměrňovače. Velikost přenášeného výkonu se

řídí šířkou pulzu. Největší energie se tedy bude přenášet, pokud tranzistor bude sepnutý po dobu $T/2$. [9]



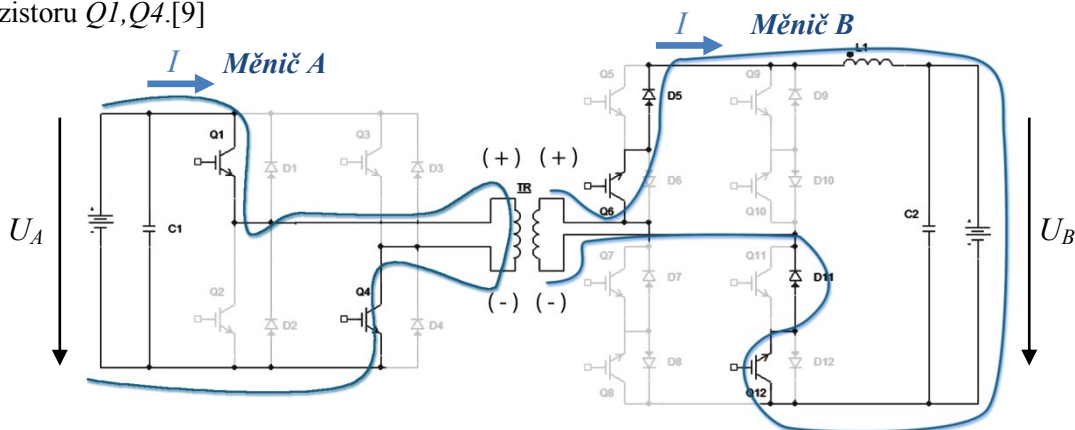
Obr. č. 3.1: Schéma zapojení obousměrného DC/DC měniče

3.2 Analýza řídicích taktů pro přenos energie ze strany A na stranu B

Jak bylo zmíněno v předešlém odstavci, jedná se o typ měniče obsahující dva jednofázové střídače. Při chodu měniče vždy jeden střídač plní funkci usměrňovače a druhý střídače. U přenosu energie ze strany A do B využíváme principu řízení jednofázového můstkového spojení. Vzhledem k faktu, že měnič obsahuje transformátor, je nutné považovat zátěž za R, L . Pro názornou ukázkou funkce měniče jsou uvedeny jednotlivé takty řízení.

Takt 1

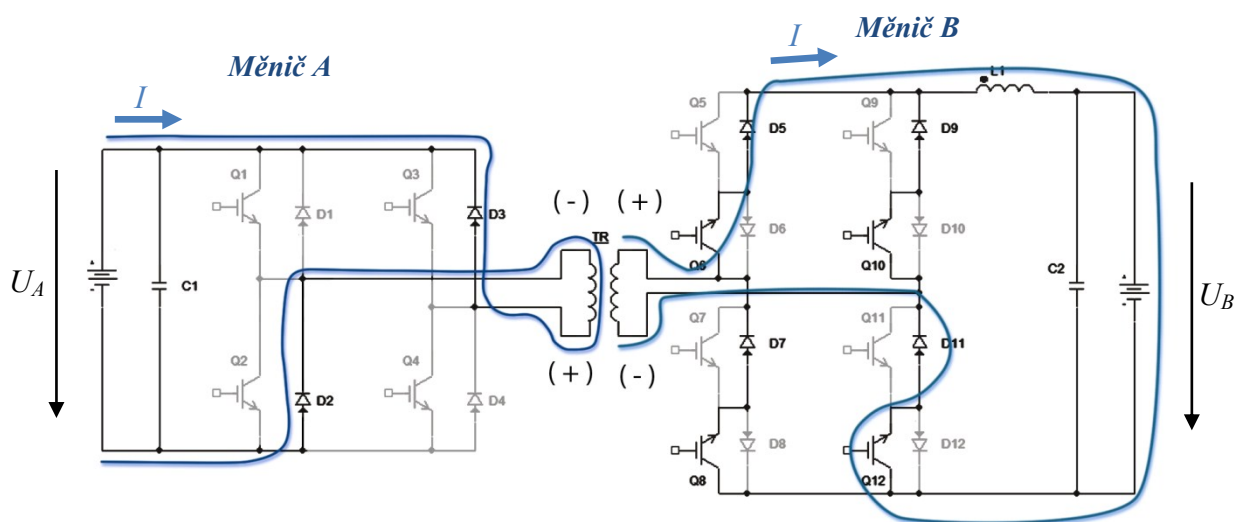
Je počáteční takt kdy sepneme tranzistory $Q1$ a $Q4$, díky kterým začne protékat proud přes RL zátěž. V případě RL zátěže platí, že napětí na zátěži je rovno napětí zdroje ($U_{TR} = U_A$). Proud v tomto případě exponenciálně narůstá k hodnotě (U_A/R), kde R je činný odpor transformátoru a L je indukčnost primárního vinutí. Pokud uvažujeme transformátor s rozptylovou indukčností L_K , platí, že při poměru 1:1 se na sekundární straně indukuje napětí o nižší hodnotě než na primárním vinutí. Vzhledem k indukci napětí na sekundárním vinutí je nutné na straně B sepnout tranzistory $Q6, Q12$, které umožní průchod proudu do zátěže. Konec tohoto taktu nastává při uzavření tranzistoru $Q1, Q4$. [9]



Obr. č. 3.2: Takt 1 průběhy proudů v měniči

Takt 2

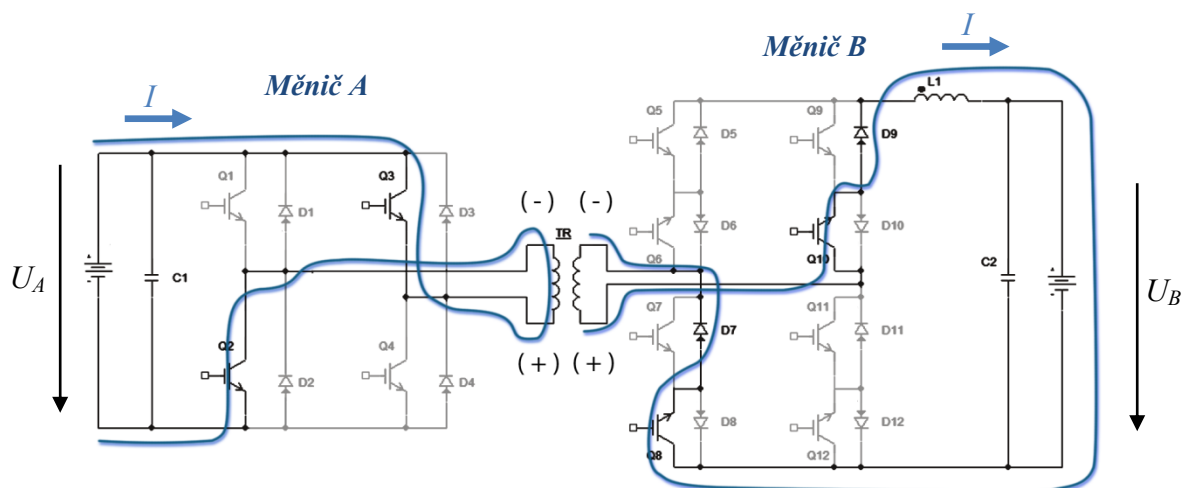
Po vypnutí tranzistoru $Q1, Q4$ proud tekoucí přes transformátor nezaniká. To je způsobeno vlivem rozptylové indukčnosti L_K , která při tomto taktu udržuje směr toku proudu přes diody $D2, D3$. Tím je na primární straně vinutí vytvořeno opačné napětí ($U_{TR} = -U_A$). Proud na zátěži v tomto taktu exponenciálně klesá k hodnotě ($-U_A/R$). Proud tekoucí přes primární vinutí udržuje napětí na sekundární straně na stejné polaritě jako v taktu $Q1, Q4$. V časovém okamžiku, kdy se proud uzavírá přes zpětné diody $D2, D3$, jsou v maticovém měniči otevřeny tranzistory $Q6, Q12, Q8, Q10$. Sepnutím těchto tranzistorů se z měniče stane dvoupulzní usměrňovač v můstkovém zapojení. Sepnutí této kombinace je nutné pro bezpečnou komutaci proudu mezi takty $Q1, Q4$ a $Q2, Q3$. Tento takt končí, jakmile proud poklesne k hodnotě blízké nule. Průběh tohoto taktu je zobrazen na obrázku č. 3.3. [9]



Obr. č. 3.3: Takt 2 průběhy proudů v měniči

Takt 3

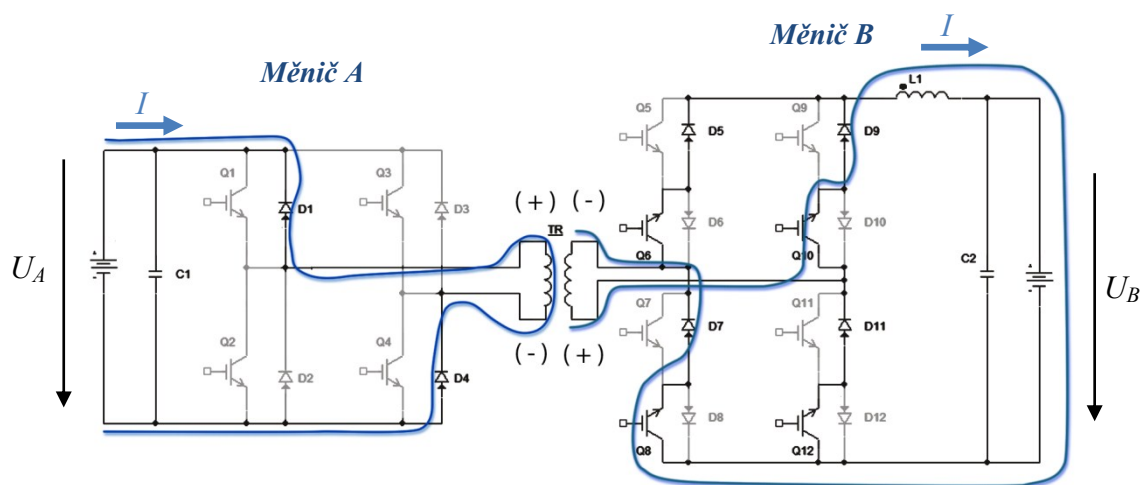
Při taktu 3 se spínají tranzistory $Q2, Q3$, které na transformátoru vytvoří napětí ($U_{TR} = -U_A$). Spínače $Q2, Q3$ se reálně mohou zapnout jen tehdy, když proud tekoucí přes zpětné diody $D2, D3$ je roven nule. Je to způsobeno závěrným napětím na diodách, jež nedovolí tranzistoru se otevřít. Po zániku proudu přes zpětné diody se tranzistory sepnou a vytvoří zmiňované napětí ($U_{TR} = -U_A$). Proud je v tomto taktu opačné polarity než v prvním taktu, tudíž klesá k hodnotě ($-U_A/R$). Tento proud vyvolává magnetický tok, který následně indukuje na sekundárním vinutí napětí. Proto je zapotřebí sepnout tranzistory $Q8, Q10$. Otevřením těchto tranzistorů uvolníme cestu pro průchod proudu do zátěže přes diody $D7, D9$. Tento takt končí uzavřením tranzistorů $Q2, Q3$. Průběh tohoto taktu je zobrazen na obrázku č. 3.4. [9]



Obr. č. 3.4: Takt 3 průběhy proudů v měniči

Takt 4

Takt 4 je obdobný s takt 2 s tím rozdílem, že proud vedou zpětné diody $D1, D4$. Proud na primární straně vinutí roste k hodnotě (U_{VI}/R) a napětí na primární straně transformátoru je $(U_{TR} = U_{VI})$. Proud v tomto taktu musí klesnout k nule. Poté co proud zanikne, obnoví se napětí na tranzistorech $Q1, Q4$ a cyklus měniče pokračuje opět v taktu 1 ($Q1, Q4$). [9]

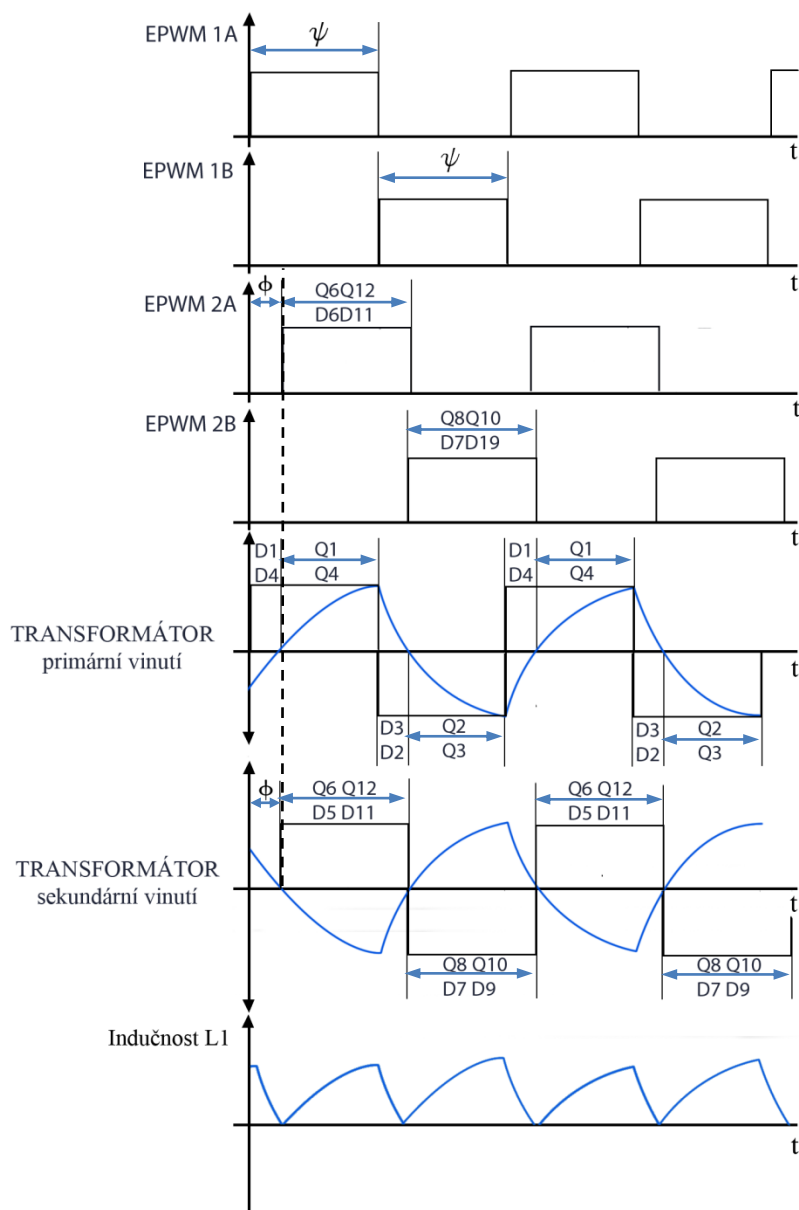


Obr. č. 3.5: Takt 4 průběhy proudů v měniči

3.2.1 Popis spínacího diagramu při přenosu energie A-B

Při návrhu spínacího diagramu je nutné vyjít ze základních koncepcí měničů. Při konfiguraci A-B je obvod v podstatě kombinací dvou měničů, a to napěťového střídače a usměrňovače. Z regulačního rozsahu napěťového střídače je patrné, že při šířkově obdélníkovém řízení je horní hranice úhlu Ψ rovna hodnotě π . Při přesažení tohoto úhlu dojde ke zkratu tranzistorů v jedné větvi, což je nežádoucí stav měniče. Usměrňovač je vytvořen pomocí správného spínání

maticového měniče. Průběhy spínacích pulzů maticového měniče a napětového střídače jsou zobrazeny na obrázku č. 3.6.



Obr. č. 3.6: Průběhy vybraných hodnot z přenosu energie ze strany A na stranu B

EPWM1A - spínací pulzy pro tranzistory $Q1, Q4$

EPWM1B - spínací pulzy pro tranzistory $Q2, Q3$

EPWM2A - spínací pulzy pro tranzistory $Q6, Q12$

EPWM2B - spínací pulzy pro tranzistory $Q8, Q10$

U_{TRA}, I_{TRA} - průběhy napětí a proudů na primárním vinutí.

U_{TRB}, I_{TRB} - průběhy napětí a proudů na sekundárním vinutí.

I_L - průběhy napětí a proudů na indukčnosti $L1$

3.3 Analýza řídicích taktů pro přenos energie ze strany B na stranu A

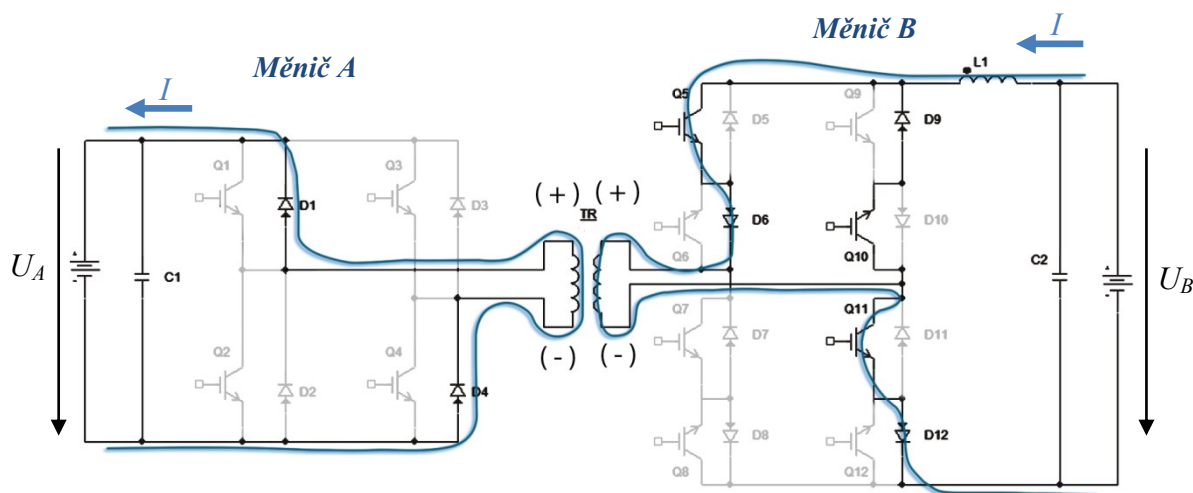
U této analýzy je nutné si uvědomit přítomnost vyhlazovací tlumivky $L1$ na straně maticového měniče, to jest na straně vstupu energie. Tlumivka by měla svou velikostí být schopna udržet téměř konstantní proud po dobu jednoho či více taktů střídače. Tato tlumivka způsobuje, že stejnosměrný zdroj má vzhledem k maticovému měniči charakter zdroje proudu. V tomto případě je nutné maticový měnič řídit jako proudový střídač.

Zvláštností proudových střídačů je přítomnost složitějších komutačních obvodů, než je tomu u napětových střídačů. Komutační obvody proudových střídačů musí plnit dva zásadní úkoly. Prvním úkolem komutačního obvodu je zajistit bezpečné vypnutí IGBT tranzistorů. Druhým je zajistit spojitý průběh proudu stejnosměrným i střídavým obvodem ve všech cyklech měniče. Podmínkou je, aby měnič při těchto cyklech vytvořil vhodné napětové poměry na transformátoru tak, aby docházelo ke změně smyslu proudu. Tak jako v předešlé kapitole jsou v následujících odstavcích uvedeny jednotlivé takty celého cyklu měniče. [9]

Takt 1

V prvním taktu při řízení maticového měniče se spíná tranzistor $Q11, Q9$. Je nutné sepnout tento spínač samostatně a po malém zpoždění $Z1$ sepnout tranzistory $Q5, Q10$. Sepnutím tranzistoru $Q5$ umožníme tok proudu do sekundárního vinutí. Tento takt vyvolá požadovanou změnu proudu nutnou pro indukci napětí na primární straně transformátoru. Vzhledem k předpokladu reálného transformátoru je nutné uvažovat s rozptylovou indukčností L_K .

Je tedy zřejmé, že musíme proudy zajistit spojitý průběh až do jeho zániku. Z tohoto důvodu se společně s tranzistorem $Q5$ otevírá i tranzistor $Q10$, který umožní proud v sekundárním vinutí komutovat přes zpětnou diodu $D9$. Průběh proudu je zobrazen na obrázku č. 3.7. Tento takt končí, jakmile se uzavírá tranzistor $Q11$. Pro znázornění posloupnosti spínání v jednotlivých taktech je v kapitole 3.3.1 uveden spínací diagram. [9]

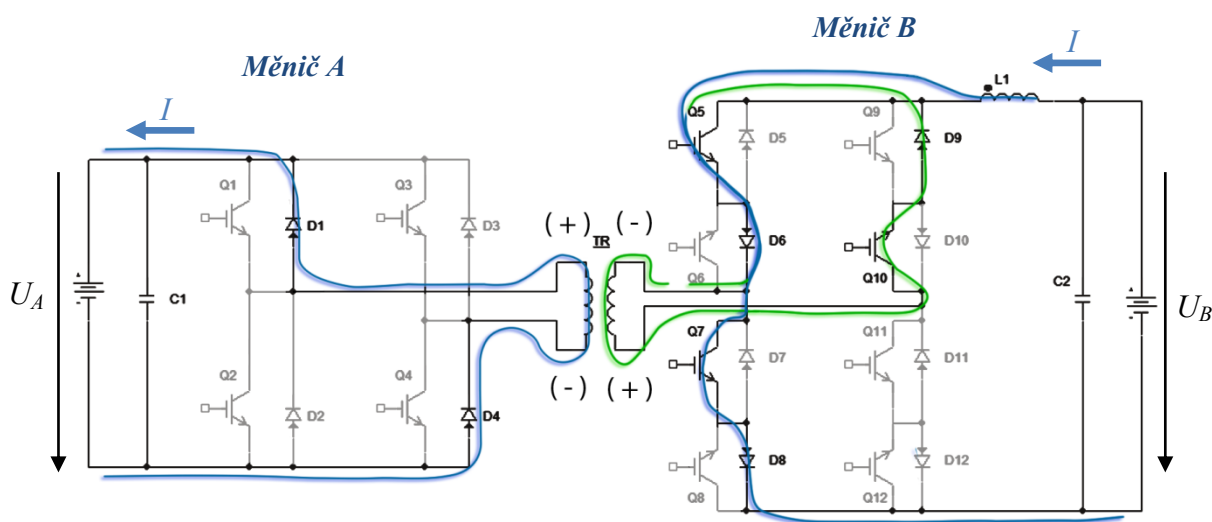


Obr. č. 3.7: Takt 1 průběhy proudů v měniči

Takt 2

Takt začíná přesně v okamžiku, kdy se uzavírá tranzistor Q_{11} . S okamžikem uzavření je nutné zajistit dvě podmínky: udržet směr toku proudu přes sekundární vinutí a udržet tok proudu, který je vnucován obvodu střídače stejnosměrným zdrojem proudu. Pro plynulou komutaci proudu transformátoru je v taktu 2 sepnut tranzistor Q_{10}, Q_5 . Spínače uzavírají přes diody D_9, D_6 cestu pro utlumení proudu na sekundárním vinutí.

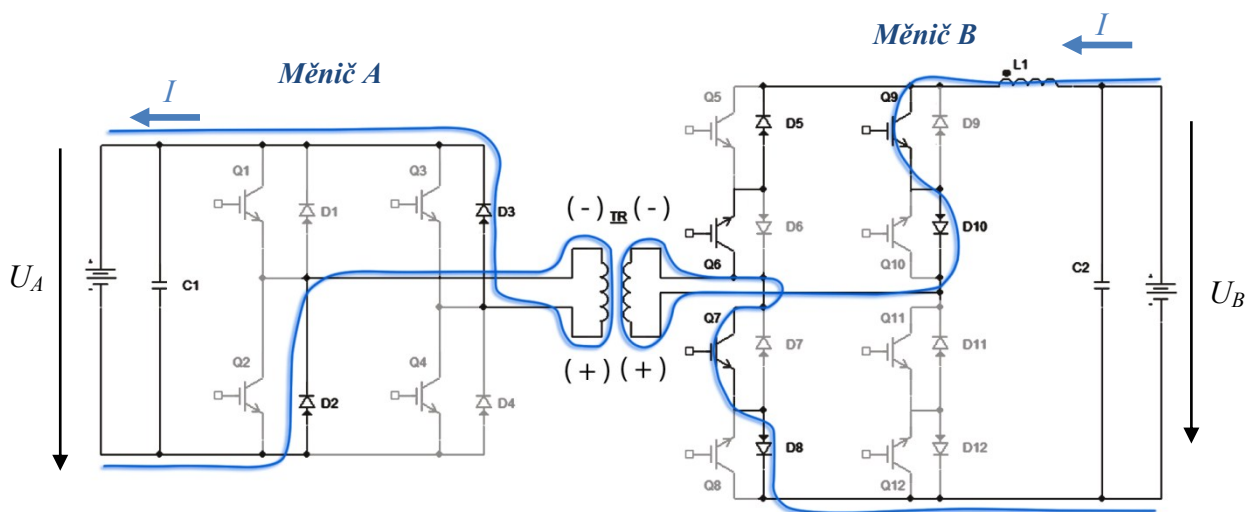
Udržení vnucovaného toku proudu se docílí tak, že se krátkodobě zkratuje obvod pomocí tranzistorů Q_5, Q_7 . Zmiňovaný zkrat je nutný pro udržení nepřerušovaného toku proudu přes tlumivku L_1 . Při nedodržení podmínky, dojde k přerušení toku proudu a na tlumivce se vytvoří přepětový pulz. Tento pulz má vysoké hodnoty přesahující maximální průrazné napětí samotných tranzistorů. Pokud nastane tato situace, může dojít ke zničení IGBT tranzistorů. Takt končí vypnutím tranzistorů Q_5, Q_{10} . Cesta toku proudu je zobrazena na obrázku č. 3.8. Pro znázornění posloupností spínání v jednotlivých taktech je v kapitole 3.3.1 uveden spínací diagram.



Obr. č. 3.8: Takt 2 průběhy proudů v měniči

Takt 3

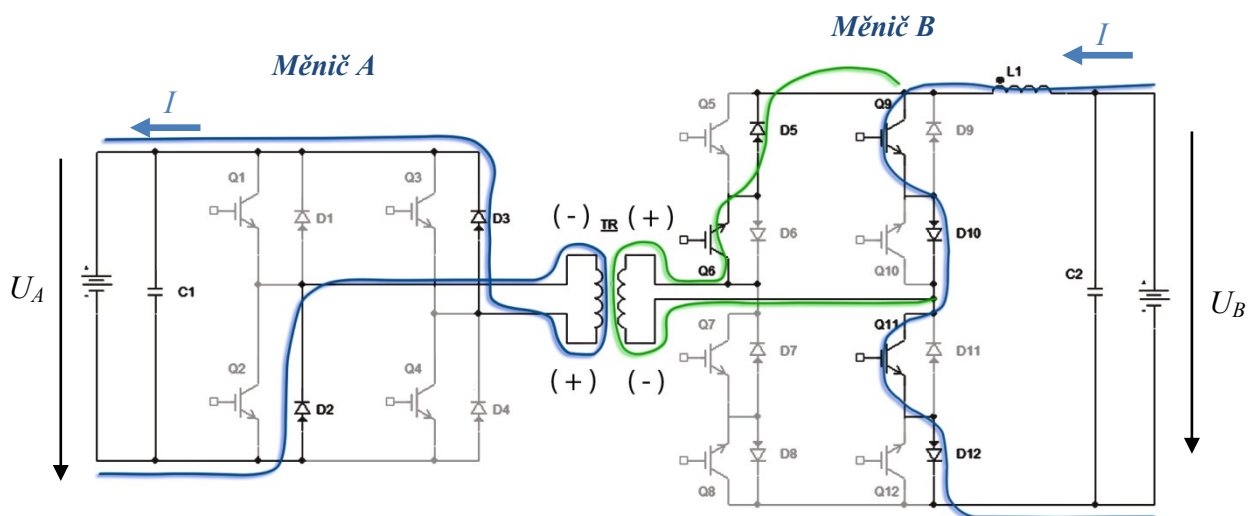
V okamžiku, kdy dojde k uzavření spínačů Q_5, Q_{10} , se musí otevřít spínač Q_9 . Sepnutí tranzistoru je nezbytně nutné pro vytvoření opačné polarizace napětí na transformátoru a vytvoření opačného toku proudu. Dále je v taktu nutné sepnout tranzistor Q_6 , který připraví vodivou cestu pro komutaci proudu z transformátoru. Zbytkový proud je způsobený rozptylovou indukčností L_K , jak již bylo zmíněno v předchozích odstavcích. Takt končí vypnutím tranzistorů Q_7 . Průběh proudu je zobrazen na obrázku č. 3.9. Pro znázornění posloupností spínání v jednotlivých taktech je v kapitole 3.3.1 uveden spínací diagram.



Obr. č. 3.9: Takt 3 průběhy proudů v měniči

Takt 4

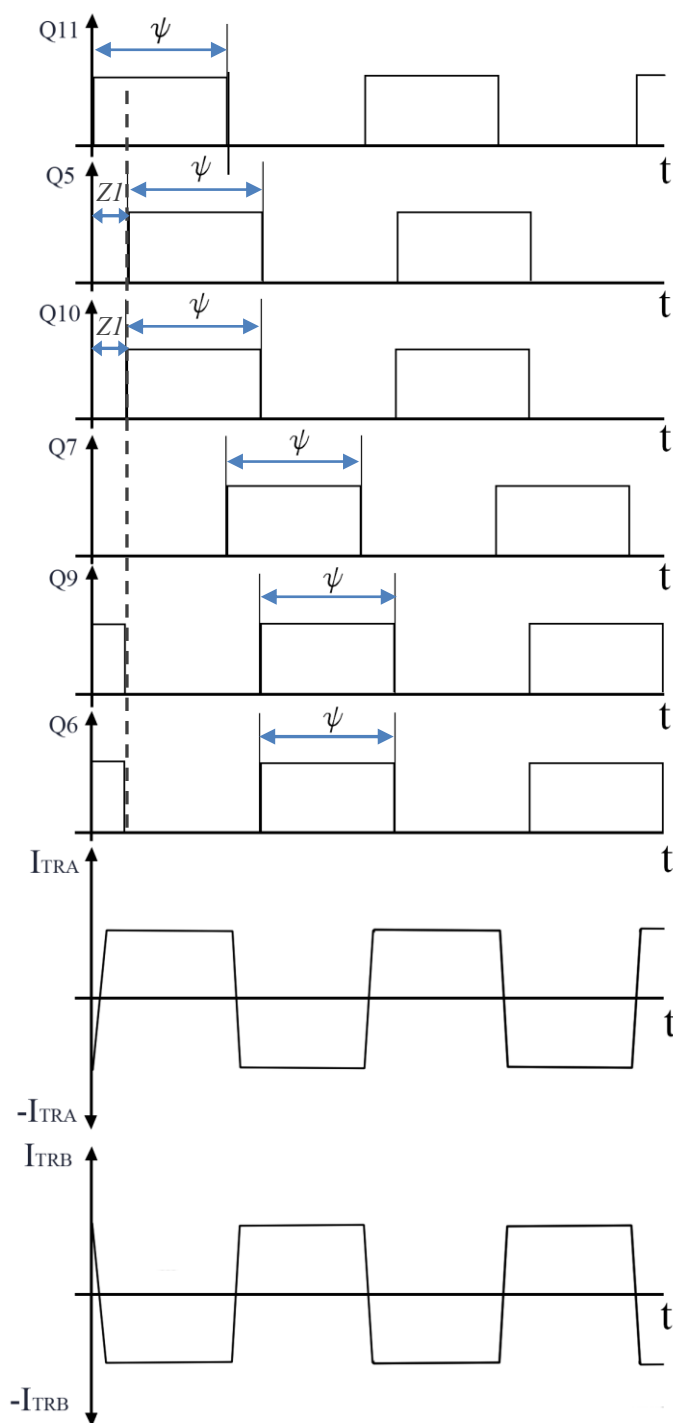
Takt 4 je velice podobný taktu 2, kdy musíme splnit požadavky kladené na proudové měniče, které mají na vstupní straně stejnosměrný zdroj proudu. Pro udržení směru toku proudu na transformátoru tedy musíme sepnout tranzistory $Q6, Q9$. Spínač $Q11$ spolu se spínačem $Q9$ krátkodobě zkratuje zdroj a tím udrží směr a tok proudu přes tlumivku $L1$. Nevýhodou tohoto zapojení je součtový proud tekoucí přes tranzistor $Q9$ v okamžiku, kdy se vybíjí přebytečná energie ze sekundárního vinutí transformátoru. Nevýhoda by měla být částečně eliminována kvalitním transformátorem s nízkou rozptylovou indukčností L_K . Takt končí vypnutím tranzistorů $Q6, Q9$. Průběh proudu je zobrazen na obrázku č. 3.10. Pro znázornění posloupností spínání v jednotlivých taktech je v kapitole 3.3.1 uveden spínací diagram.



Obr. č. 3.10: Takt 4 průběhy proudů v měniči

3.3.1 Popis spínacího diagramu při přenosu energie B-A

Spínací diagram zobrazuje řídicí pulzy pro spínání maticového měniče. Spínací diagram spolu s předchozí kapitolou podrobně popisuje chod jednoho cyklu maticového střídače proudového typu. Diagram také obsahuje idealizovaný průběh proudu na primárním a sekundárním vinutí. Detailnější rozbor průběhů napětí a proudů je obsažen v kapitole 4.1 (Simulace přenosu energie ze strany *B* na *A*).

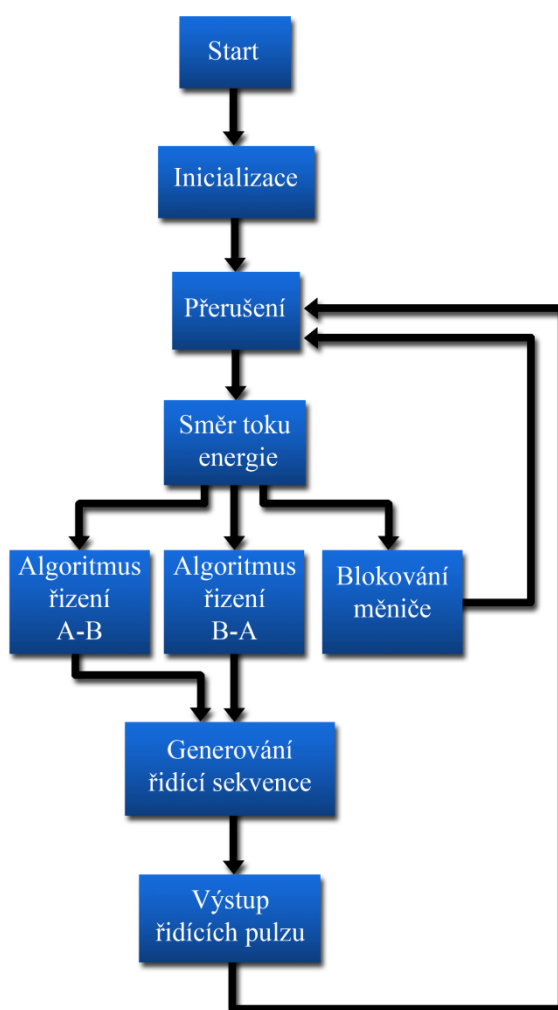


Obr. č. 3.11: Průběhy vybraných hodnot z přenosu energie ze strany *B* na stranu *A*

3.4 Algoritmus řízení

Pro vyvíjení specifických algoritmů je nezbytné znát přesnou funkci zařízení. Základní algoritmus zobrazen na obrázku 3.12 popisuje myšlenku řízení reverzibilního měniče. Tyto myšlenky jsou založeny na předpokladu aplikace měniče pro přenos a vyrovnávání energií v akumulátorech. Tak jako každý algoritmus má i tento svůj start a inicializaci potřebných periférií pro správnou funkci. V oblasti přerušení se vykonávají události, jako jsou nastavení PWM, čtení A/D převodníků a komunikace s nadřazeným systémem.

Na základě hodnot z ADC a nadřazeného systému se algoritmus rozhoduje o směru toku energie v měniči. Proto je nezbytnou součástí znát detailní subalgoritmy řízení pro daný typ přenosu energie. Tyto subalgoritmy jsou v podstatě popsány v kapitolách 3.2 a 3.3. Za zmínku také stojí uvedení blokování měniče, které je nedílnou součástí celého algoritmu pro bezpečný provoz. Po rozhodnutí algoritmu, o jaký způsob řízení se jedná, nastává důležitá část, kterou je generování řídicí sekvence a vyslání řídicích pulzů do výkonové části.



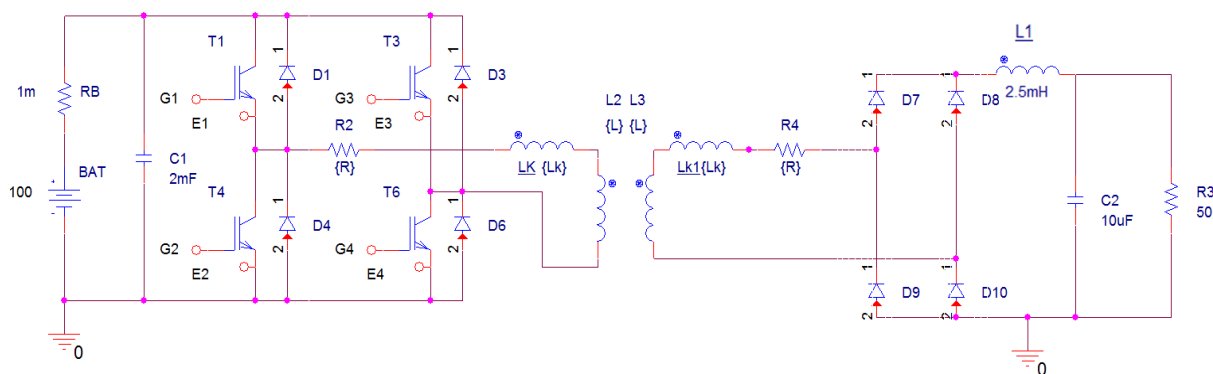
Obr. č. 3.12: Základní algoritmus pro řízení

4. Simulace reverzibilního DC/DC měniče

Numerické simulace jsou nedílnou součástí navrhování jakéhokoli elektronického zařízení. V dnešní době existuje několik simulačních prostředí pro elektronické obvody. Pro simulace byl v diplomové práci použit program Orcad Pspice. Je to jeden z významnějších simulátorů, který disponuje velikou silou pro návrh elektronického zařízení. [10,11]

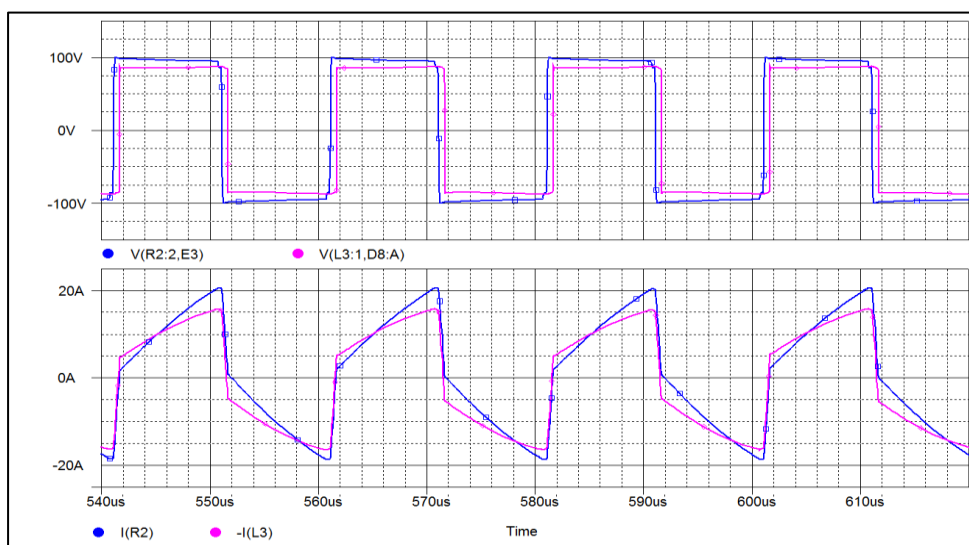
4.1 Simulace přenosu energie ze strany A na B

Při simulacích bylo využito jistého zjednodušení reverzibilního měniče. Zjednodušení spočívá v tom, že při daném směru energie ($A-B$) se maticový měnič využívá jako dvojčinný můstkový usměrňovač. Proto je v zapojení maticový měnič nahrazen usměrňovačem. Na vstupní straně zůstává jednofázový střídač.



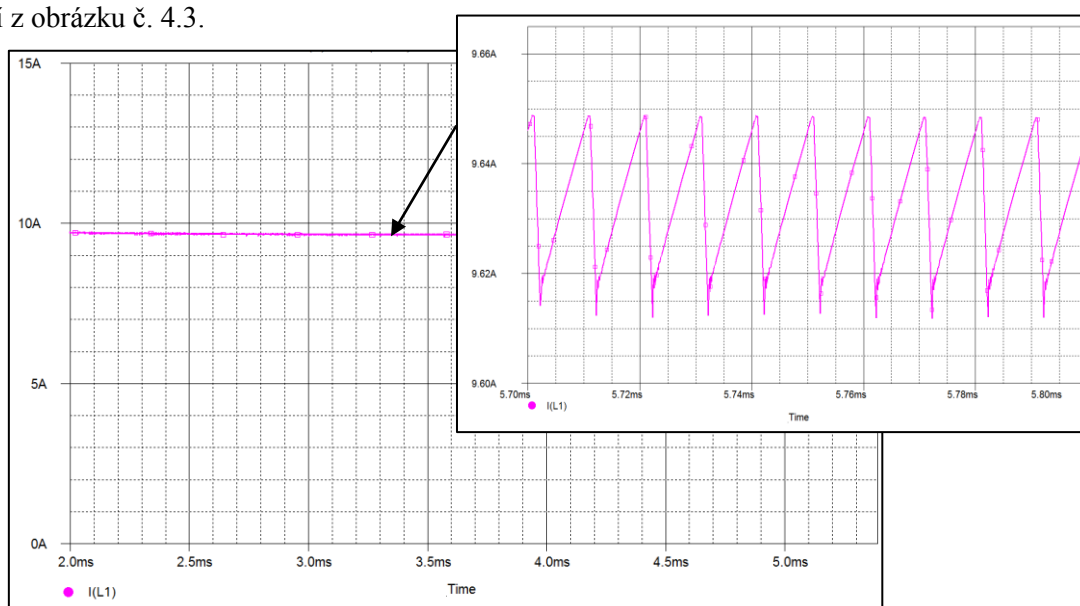
Obr. č. 4.1: Zjednodušené schéma pro simulaci přenosu energie $A-B$

Následující průběhy jsou uvedeny zejména pro ověření a podložení kapitoly 3.2, která popisuje mód reverzibilního DC/DC měniče pro přenos energie ze strany A na stranu B . Na obrázku č.4.2 jsou zobrazeny nasimulované průběhy při zatěžiteli $z = 0,5$.



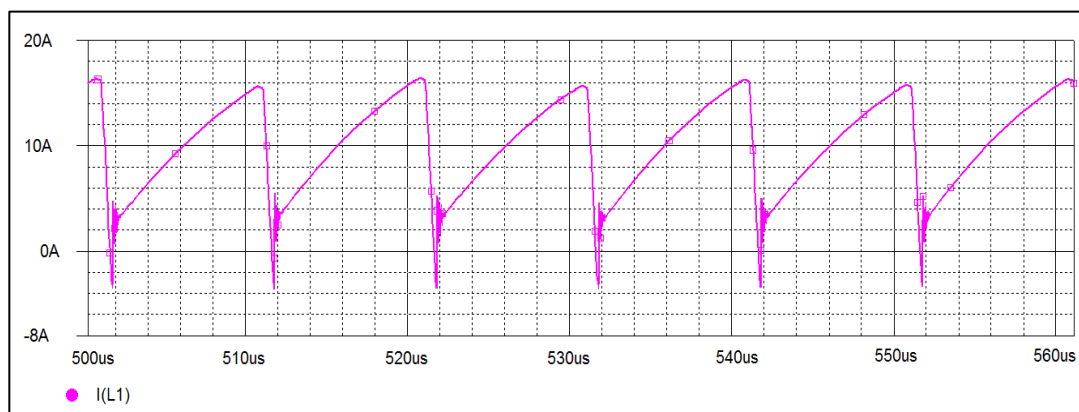
Obr. č. 4.2: Schéma zapojení obousměrného DC/DC měniče

Simulace znázorňuje průběhy napětí a proudů na transformátoru, kde si můžeme všimnout zpoždění napětí na sekundárním vinutí. Zpoždění je především způsobeno rozptylovou indukčností L_K . Tato indukčnost způsobuje nedokonalý přenos energie přes transformátor, což vyplývá z náhradního schématu transformátoru. Díky nedokonalému přenosu energie z primární indukčnosti do magnetického obvodu je část energie vrácena zpět do zdroje. Energie je do zdroje vrácena jako jalová složka. Proces je popsán v kapitole 3.2 jako Takt 2, kdy proud komutuje přes zpětné diody. Popis děje je důležitý pro řízení přenosu energie $A-B$, tak aby byl maticový měnič řízen se zpožděním blízkým zpoždění napětí na sekundárním vinutí. Další obrázek ukazuje průběh proudu přes indukčnost $L1$ maticového měniče. V simulaci byly vyvolány dvě situace. První situace je se spojitým a vyhlazeným proudem na indukčnosti $L1$ dle schématu. Hodnota indukčnosti $L1$ je 2.5mH. Díky takto velké indukčnosti je proud mírně zvlněný, jak znázorňuje přiblížení z obrázku č. 4.3.



Obr. č. 4.3: Průběh proudu na indukčnosti $L1$

Druhá situace znázorňuje stav, kdy je indukčnost vzhledem k nízké hodnotě zanedbatelná a proud je tak silně zvlněný. Hodnota indukčnosti $L1$ je 1uH. Proud je naprosto nevyhovující z hlediska namáhání kondenzátorů (AC Ripple Current).

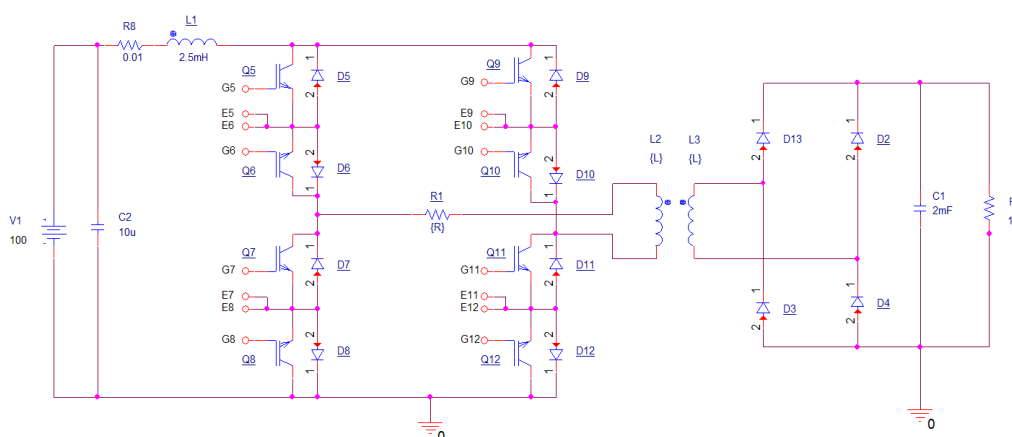


Obr. č. 4.4: Průběh proudu na indukčnosti $L1$

4.1 Simulace přenosu energie ze strany B na A

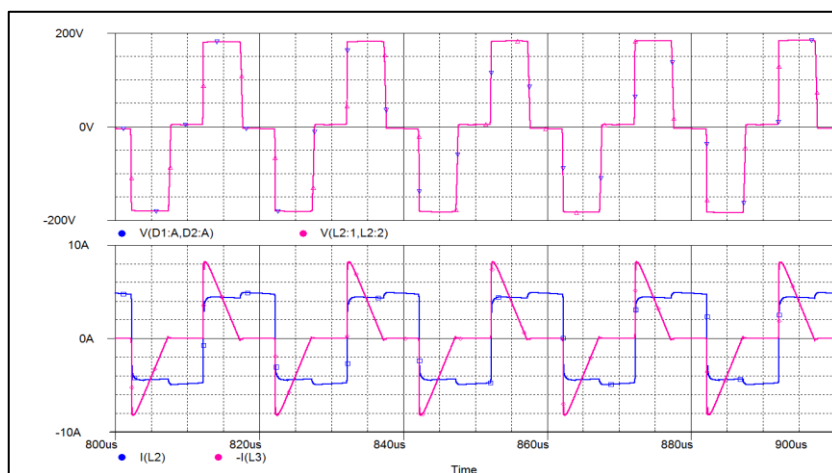
Při simulaci přenosu energie ze strany *B* na stranu *A* bylo opět využito zjednodušení obvodu. Toto zjednodušení spočívá v nahrazení jednofázového střídače dvoupulzním můstkovým usměrňovačem. V této simulaci je důležité ověřit přenos energie přes transformátor, který je reprezentován pomocí indukčnosti $L2, L3$. Tyto indukčnosti mají společnou vazbu. Pokud se v simulaci koeficient společné vazby nastaví na hodnotu 1, tak indukčnosti představují dokonalý transformátor bez rozptylové indukčnosti L_K a jiných parazitních parametrů. Řízení maticového měniče je podrobně popsáno v kapitole 3.3.

Parametry simulace : $L2, L3$ - 100 μ H Frekvence spínání – 50kHz
 $R2$ – 0.1 Ω $R6$ – 10 Ω , 100 Ω
 $L1$ – 2.5 mH
 $R1$ – 0.01 Ω



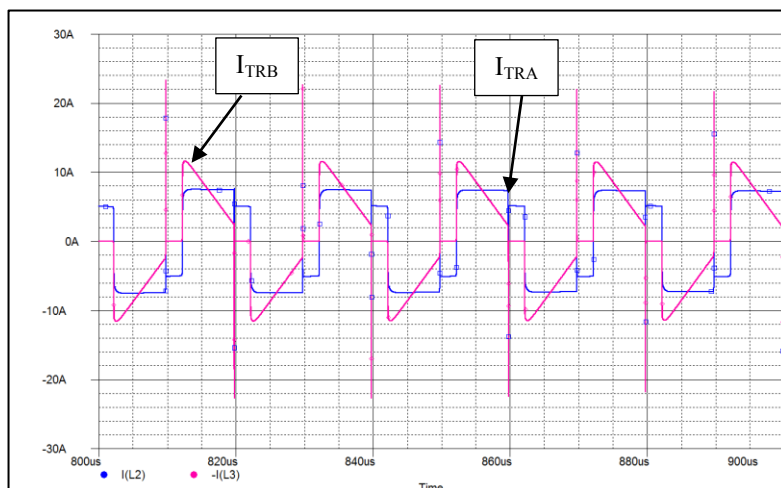
Obr. č. 4.5: Schéma pro simulaci přenosu energie B-A

Jedním z nejdůležitějších aspektů této simulace je analýza proudů a napětí na tlumivce $L1$ a transformátoru tvořeného indukčnostmi $L2, L3$. Přednes o průběhu proudů a napětí na tlumivce byl několikrát specifikován v předešlých kapitolách, tudíž budou vysvětleny jen důležité informace týkající se správného řešení měniče.



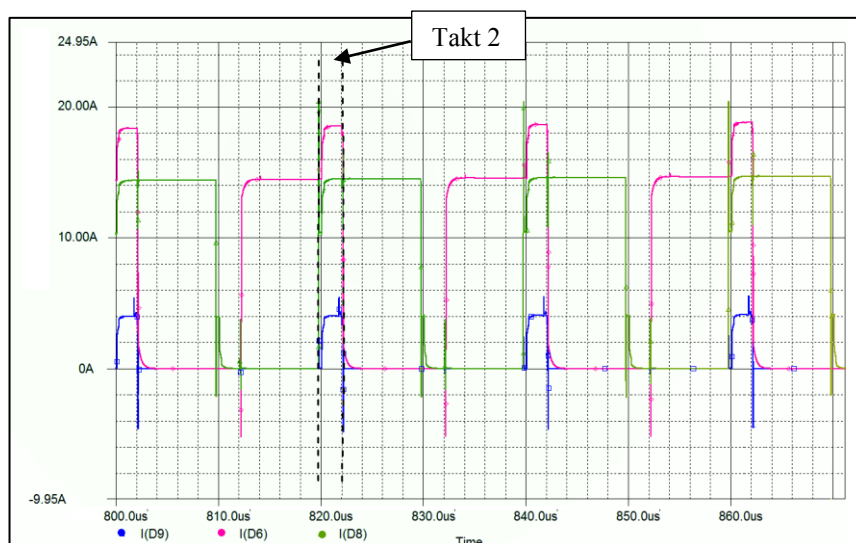
Obr. č. 4.6: Průběhy proudů a napětí na transformátoru

Na obrázku 4.6 je zobrazen průběh proudu a napětí na primárním a sekundárním vinutí. Horní část obrázku popisuje průběh napětí a spodní část popisuje průběh proudu. Vzhledem k tomu, že je v simulaci nastaven ideální transformátor, napětí na primární a sekundární straně je totožné. Co se týká proudů, je nutné podotknout, že pro přehlednost je hodnota proudu invertovaná. Proud na primárním vinutí je ovlivněn zátěží, která v případě obrázku 4.6 neodebírá příliš velký proud. Zátěž představuje odpor $R6$ o hodnotě $100\ \Omega$. Pro ukázkou je na obrázku 4.7 uveden průběh při snížené hodnotě odporu $R6$ na $10\ \Omega$.



Obr. č. 4.7: Průběhy proudů na transformátoru

U toho řízení je nutné si uvědomit přítomnost součtového proudu. Tento proud je přítomen v měniči při taktu 2 a taktu 4. Součtový proud je v taktu 2 veden tranzistorem $Q5$ a diodou $D6$. V taktu 4 je proud veden přes tranzistor $Q9$ a diodu $D10$. Za této situace je při dimenzování nutné počítat s větším zatěžováním těchto tranzistorů a diod. Pro představu je součtový proud označen na obrázku 4.8.

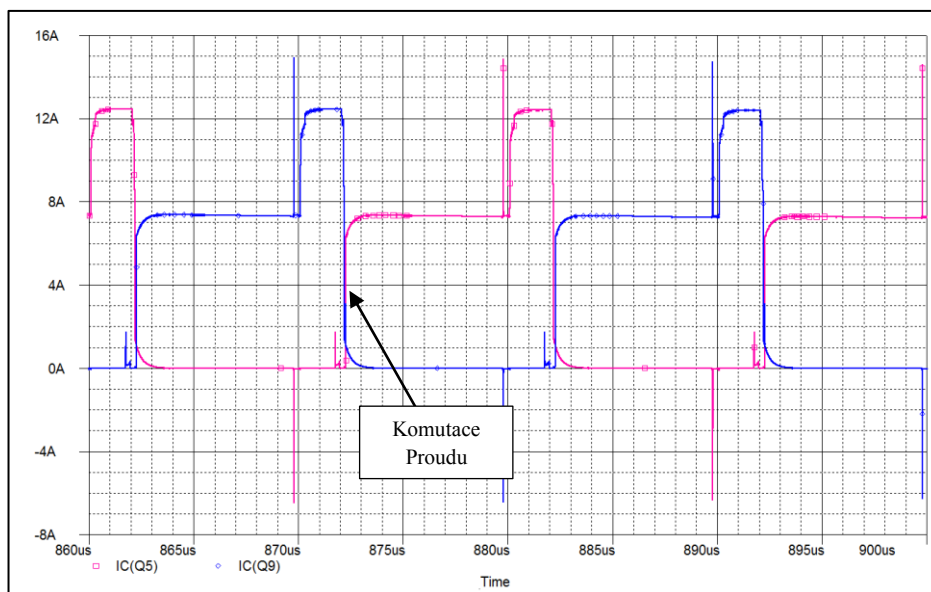


Obr. č. 4.8: Součtový proud

Na obrázku jsou vyznačeny oblasti čerchovanou čarou. Tyto oblasti označují druhý takt měniče. Jak lze vidět, dochází k součtu proudu ze sekundárního vinutí I_{D9} s proudem I_{Q7} , který udržuje tok proudu vnucovaný tlumivkou LI .

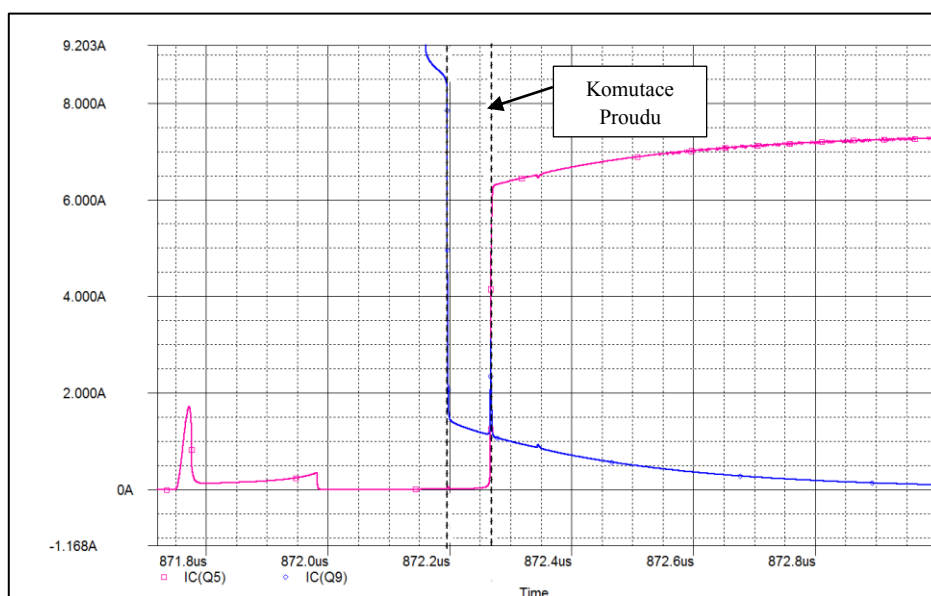
Komutace proudu mezi spínači Q5 a Q9

Řešení dějů komutace mezi tranzistorem $Q5$ a $Q9$ vychází z obrázku 4.9 a 4.10. Tyto obrázky znázorňují komutaci nuceného proudu z tlumivky LI .



Obr. č. 4.9: Komutace proudu mezi tranzistorem $Q5$ a $Q9$

Pro přiblížení průběhu komutace proudu je uveden obrázek 4.10. Vyznačená doba komutace trvá přibližně 60ns.

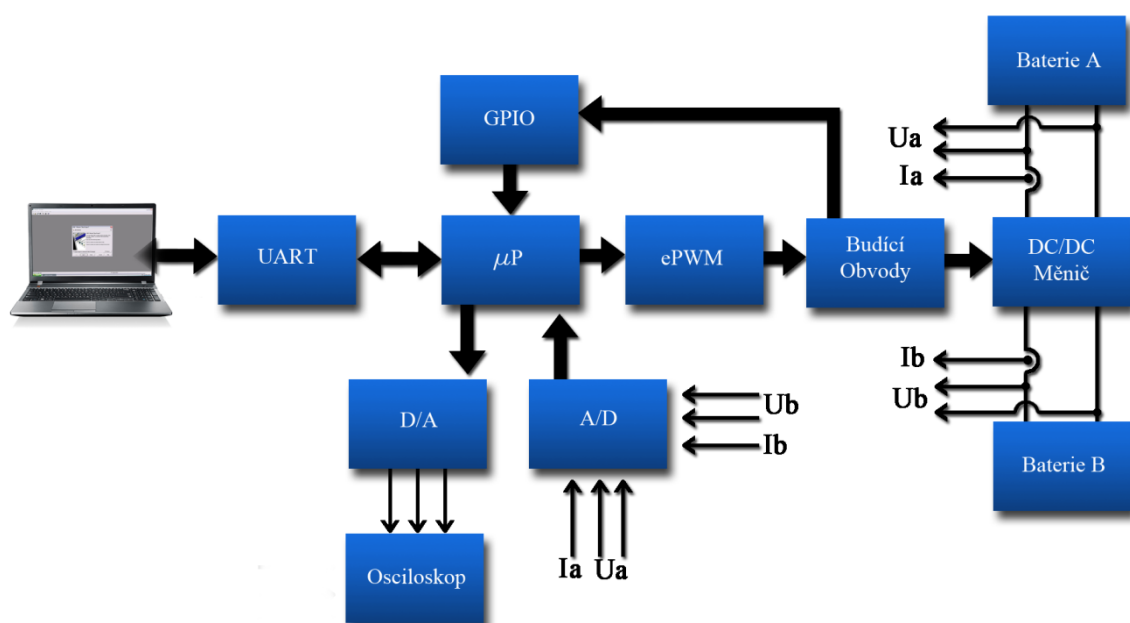


Obr. č. 4.10: Průběh komutace proudu

5. Návrh řídicího systému reverzibilního DC/DC měniče

Řídicí systém je zařízení, které je používáno pro řízení různých technologických procesů. V této situaci je řídicí systém velice specifický. Jedná se o systém, který má být schopen velmi rychlé reakce z důvodů vysokých spínacích kmitočtů a poměrně složitých výpočtů. Tak jako každý řídicí systém, je i tento rozdělen do několika částí:

- **Řídicí část** obsahující potřebné periferie a algoritmus pro řízení měniče.
- **Výkonová část** obsahující složitou kombinaci dvou měničů a dalších obvodových prvků.
- **Nadřazené řízení** potřebné při diagnostice a řízení vzdáleného měniče. Na obrázku 5.1 je uvedeno základní blokové schéma řídicího systému reverzibilního měniče.



Obr. č. 5.1: Blokové schéma řídicího systému reverzibilního DC/DC měniče

Řídicí část

Do této kategorie patří vše, co se týká zpracování digitálních signálů. Z obrázku 5.1 zde můžeme zařadit mikroprocesor, ePWM, D/A, A/D, UART a také budící obvody. Mikroprocesor je část systému zpracovávající všechna data z D/A převodníků a komunikací, jako je například UART. Na základě dat procesor vyhodnocuje výstupní hodnoty a nastavuje správné řídicí pulzy do ePWM jednotky. Pro zobrazení analogových hodnot je zde zařazen D/A převodník. Na výstup tohoto převodníku, můžeme přivést jakoukoli hodnotu z procesoru a reprezentovat ji tak v podobě analogového signálu. V blokovém diagramu je znázorněna komunikace s nadřazeným systémem pomocí komunikace UART. Tato periferie slouží pro diagnostiku a vzdálené řízení reverzibilního měniče. Všechny tyto periferie jsou díky dnešním technologiím integrovány do jednoho čipu.

Tento čip je známý pod názvem mikrokontrolér. Budicí obvody jsou periferie, které se nachází na pomezí řídicí a výkonové části systému. Budiče obstarávají několik důležitých funkcí. Zajišťují spolehlivé sepnutí výkonových tranzistorů, desaturační ochrany a zabráňují jiným nežádoucím stavům měniče.

Výkonová část

Výkonová část obsahuje měnič a dva akumulátory jako stejnosměrné zdroje. Funkce měniče je detailně popsána v předchozích kapitolách. Akumulátory jsou zde uvedeny z důvodu přečerpávání energie z jedné baterie do druhé. V této aplikaci se jedná spíše o laboratorní výzkum než o reálnou aplikaci. Pro příklad aplikace by blokové schéma muselo být doplněno dalším měničem, a to například střídačem, který by mohl sloužit jako pohon pro asynchronní motor.

Nadřazený systém

Tato kapitola by mohla být velice rozsáhlá, a proto se následující popis snaží o její zjednodušení. Za předpokladu použití reverzibilního měniče v aplikaci zobrazené na obrázku 5.1 je nadřazený systém určen pouze pro řízení a diagnostiku měniče. Možnosti nadřazeného systému jsou předem nadefinované. To znamená, že míru „nadřazenosti“ určuje hlavně strojový kód aplikovaný do mikropočítače.

5.1 Digitální signálový mikrokontrolér TMS320F28335

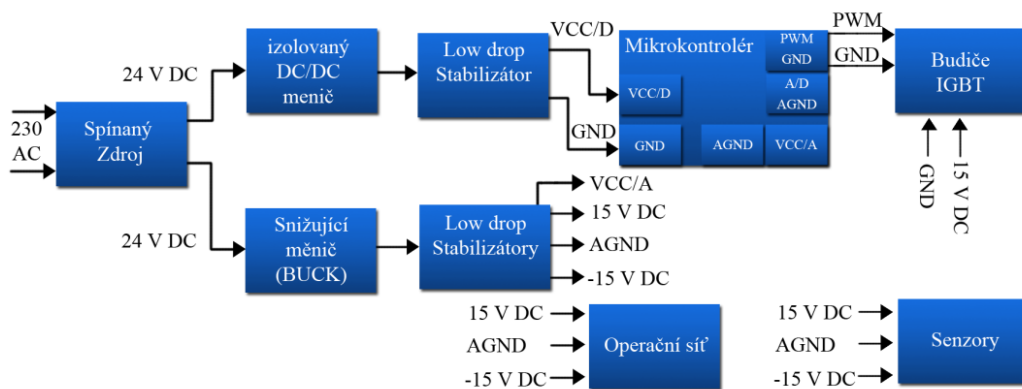
TMS320F28335 je výkonný signálový mikrokontrolér s harvardskou architekturou, který je především určen pro řízení elektrických pohonů. Tento procesor je postaven na bázi CMOS technologie, díky které dokáže pracovat na frekvenci 150 MHz. Čas strojového cyklu je tedy 6.67 ns. Kontrolér potřebuje pro správnou činnost dvě různá napětí 1,9 a 3,3 VDC. Každý jeho GPIO tedy bude mít výstup na napětíové úrovni 3.3 V. CPU pracuje s 32 bitovou šířkou slova a vzhledem k implementované FPU dokáže počítat s plovoucí řádovou čárkou podle normy IEEE-754. Vzhledem k možnostem mikrokontroléru a výpočetnímu výkonu se dá s výhodou použít pro řízení reverzibilního DC/DC měniče. Po doplnění mikrokontroléru vhodnými hardwarovými periferiemi, jako jsou operační zesilovače, budiče sběrnic, napětíové reference a izolované DC/DC měniče, je možné měnič bezpečně a spolehlivě řídit. Pro výpočty je v architektuře kontroléru obsaženo několik jednotek MAC. Další parametry jsou popsány v následující tabulce. [12]

CPU	C28335
Peak MMACS	150
FPU	Yes
Frekvence	150 MHz
RAM	68 KB
Flash	512 KB
EMIF	32/16-Bit
DMA	6-Ch DMA
PWM	18 -Channels
CAP/QEP	6/2
Timers	3x 32 Bit CPU
ADC Modules	1
ADC Sample & Hold	Dual
ADC Resolution	12-Bit
ADC Channels	16
ADC Conversion Time	80 ns
McBSP	2
SPI	1
I2C	1
UART (SCI)	3
CAN	2
GPIO	88

Obr. č. 5.2: Parametry DSC [12]

5.2 Obvody pro napájení mikrokontroléru a hardwarových periférií

U navrhování zdroje napětí pro řídicí systém bychom měli být velice obezřetní při výběru součástek. Zejména by měl být kladen důraz na správné rozdělení jednotlivých napájecích větví. V dnešní době existují integrované obvody pro galvanické oddělení, které jsou nezbytně nutné k omezení či k úplnému zamezení šíření rušivých signálů. Mezi další věci, důležité při navrhování DPS patří správné rozdělení zemí. To znamená, že analogová zem je oddělena od digitální. Příklad správného zapojení napájecího zdroje pro řídicí systém je znázorněn na obrázku č. 5.3.



Obr. č. 5.3: Blokové schéma napájení řídicího systému

Blokové schéma znázorňuje jednu z mnoha možností, jak vytvořit stabilní napětí bez rušení, které je nezbytně nutné pro chod celého řídicího systému.

- 1) **Spínaný zdroj** - slouží jako stabilní zdroj napětí s vysokou účinností, který má zaručit potřebný výkon a galvanické oddělení napájení od síťového napětí.
- 2) **Snižující měniče (BUCK)** - integrované obvody, které fungují na podobném principu jako spínaný zdroj. Snižují napětí na hodnotu potřebnou pro správnou funkci, např. logických obvodů.
- 3) **Low drop stabilizátory** - jsou analogové integrované obvody, které dokáží s velkou přesností udržet stabilní napětí pro kvalitní fungování mikrokontroléru. V posledních letech má většina kvalitních stabilizátorů implementované ochrany proti zkratu a přetížení. V případě mikrokontroléru TI 28335 je potřeba zajistit dvě větve napájení, a to 1.9V a 3.3 V.
- 4) **Izolovaný DC/DC měnič** – je měnič s galvanickým oddělením. Tyto typy měničů se opět dělají v integrované formě a jsou využívány především proti silnému rušení, které vzniká při spínání výkonových částí obvodu.

5.3 Digitální obvody

Rozšíření mikrokontroléru o podpůrné digitální obvody je nutností pro komunikaci a interakci s okolím. V případě přizpůsobení řídicího systému na reverzibilní DC/DC měnič je potřeba specializovaných integrovaných obvodů. Tyto obvody se využívají pro správné zesílení řídicích pulzů, komunikaci a v neposlední řadě ke zvýšení bezpečnosti provozu měniče.

Budiče sběrnice - tento typ integrovaných obvodů slouží především k zesílení a správnému buzení vstupních tranzistorů budiče.

Komunikace - V dnešní době je jedno z nejpoužívanějších komunikačních rozhraní USB. Proto je nutné zařadit tuto komunikaci do řídicího systému. Firma FTDI se zabývá vývojem a produkcí integrovaných obvodů pro převod komunikace UART na USB. Čip je známý pod názvem FT232RL. Komunikace přes USB rozhraní je určena spíše pro odladění řídicího algoritmu. V průmyslovém prostředí se spíše využívají komunikace CAN a PROFIBUS.

Rozšíření paměti - jako každý mikrokontrolér i TMS320F28335 obsahuje interní paměť s názvem SARAM. Tuto paměť můžeme rozšířit o externí paměť, která slouží pro uchování rychlých dějů. [12]

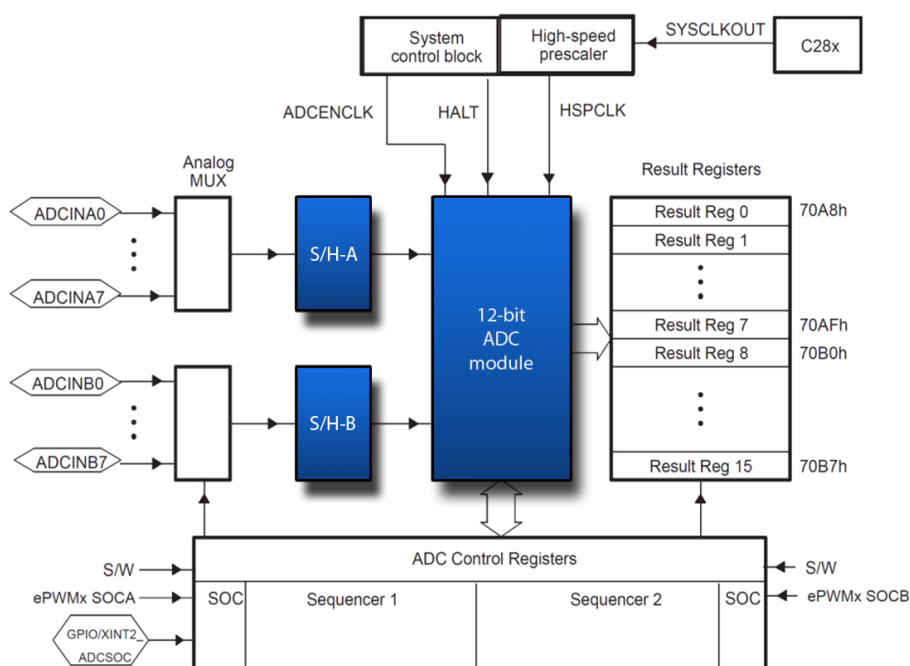
Optočleny - jsou nedílnou součástí každého měniče. Optočleny se používají pro galvanické oddělení obvodů. Nejčastější aplikace: enkodéry, komunikace, budicí obvody.

5.4 Analogové obvody

Analogové obvody jsou nezbytnou součástí řídicích systémů pro styk s okolím. Pokud chceme znát fyzikální veličiny měniče, jako je například proud, teplota či napětí, musíme do obvodu zařadit snímače. Tyto snímače mají ve většině případů analogový výstup v podobě proudového či napěťového signálu. Tento signál musí být upraven na správnou napěťovou úroveň daného mikrokontroléru. Rozsah vstupních ADC TMS320F28335 je od 0 V do 3 V. Pro správnou reprezentaci hodnot ze snímačů využíváme operační zesilovače v diferenčním zapojení.

A/D převodník

Mikrokontrolér obsahuje 12 bitový A/D převodník. Tento převodník má dva kanály „sample and hold“ s osmi vstupy. Může také fungovat v režimu jednorázového převodníku se 16 vstupy. Převodník je oproti klasickému vylepšen o různé funkce, jako jsou například simultánní převod (převod dvou hodnot ve stejný čas), sekvenční převod či vícenásobný převod jednoho kanálu. A/D převodník má možnost konfigurace na dva nezávislé 8 kanálové bloky pro obsluhu přerušování ePWM modulů. Bloky převodníku je možné seřadit kaskádně, čímž se vytvoří jeden šestnácti kanálový modul. Jak je vidět na obrázku č. 5.4, celý AD převodník má pouze jeden 12 bitový převodník.



Obr. č. 5.4: Blokové schéma A/D převodníku [13]

Operační zesilovače

Operační zesilovač je stejnosměrný zesilovač s velkým zesílením a malým vlastním rušením. Tyto zesilovače jsou schopny pracovat s velkou stabilitou v uzavřené zpětnovazební smyčce. Operační zesilovač je nejpoužívanější elektronický prvek při zpracovávání analogových signálů. U řídicích systémů se z velké části využívá na úpravu analogových signálů z čidel. Dále se ve velké míře vyskytuje v různých integrovaných obvodech, jako jsou nadproudové ochrany, stabilizátory, snímače, násobičky, převodníky atd. Dnešní portfolio OZ, ač ve formě diskrétní součástky či složitějšího integrovaného obvodu je díky rozšířenému trhu s elektronikou opravdu široké.

Snímače

Při navrhování jakéhokoli systému je nutností mít přehled o fyzikálních veličinách a chování systému v průběhu jeho provozu. Na tomto základě potřebujeme vhodné snímače, které nám fyzikální hodnoty poskytnou. Vhodný výběr snímačů je naprosto zásadní pro správné fungování jakéhokoli zařízení.

Snímače napětí – jsou určeny pro měření elektrického potenciálu. Pro realizaci těchto snímačů se využívá řada fyzikálních principů. Na základě použité konstrukce a principu jsou snímače děleny do kategorií podle frekvenčního rozsahu, přesnosti, rozsahu měřeného napětí a ceny. Vzhledem k předešlé analýze reverzibilního měniče je jasné, že požadavky na snímače napětí budou vysoké. Snímače musí mít velice kvalitní frekvenční vlastnosti. Co se týká kontroly stejnosměrných napětí, vystačí kompenzační snímač napětí s Hallovou sondou.

Snímače proudu – V případě snímání proudu se zakládá na velice podobných principech jako u napěťových snímačů, s tím rozdílem, že výstupní informace ze snímače je vázána na hodnotu proudu tekoucího měřeným obvodem. U laboratorního vzorku reverzibilního měniče se uvažuje maximální spínací kmitočet 50 kHz. Na základě tohoto předpokladu by měl vystačit snímač proudu s Hallovou sondou.

Snímače teploty – Snímače teploty nebo také teplotní senzory zpravidla tvoří zpětnou vazbu měřicího řetězce. Hlavní součástí teplotních senzorů jsou teplotní čidla, která převádí teplotu na jinou fyzikální veličinu na základě určitého principu. Mezi velmi často používané snímače teploty v praxi patří odporové kovové senzory.

6. Realizace fyzikálního vzorku

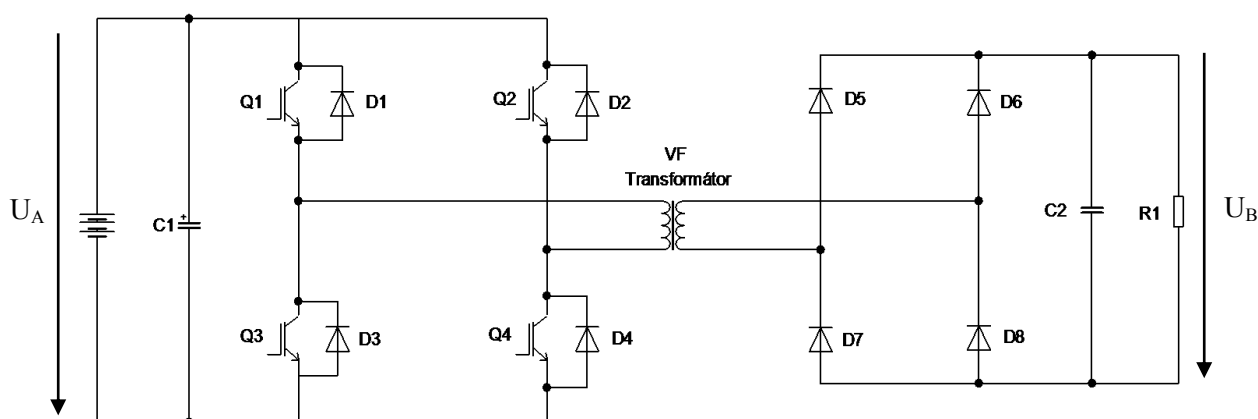
Vzhledem ke složitosti a komplexnosti reverzibilního měniče se realizovala jen jeho část, nikoli celý měnič. Pro sestavení tohoto měniče byla využita školní platforma řídicí jednotky osazená mikrokontrolérem TMS320F28335 a výkonové části třífázového střídače.

Řídicí jednotka obsahuje potřebné periferie pro řízení velké škály různých typů měničů. Je vybavena potřebnými obvody pro zpracování analogových signálů, komunikaci a správné řízení budících obvodů. Jednotka řeší také napájení a ochranu obvodů proti zkratu a přetížení. Z těchto důvodů byla jednotka využita pro prototyp reverzibilního měniče.

Pro realizaci laboratorního vzorku bylo zapotřebí zvládnout několik dílčích úloh:

- Nastudování obvodových schémat řídicí jednotky
- Zvládnutí programovací prostředí, včetně znalostí samotného mikrokontroléru
- Bylo zapotřebí přestavět třífázový střídač na jednofázový
- Nastudovat firemní dokumentaci k budícím obvodům Concept 6SD 106EI

Po zvládnutí dílčích úkonů byl realizován jednofázový střídač pro reprezentaci přenosu energie z měniče A na stranu měniče B. Schéma sestaveného laboratorního vzorku je zobrazeno na obrázku 6.1.

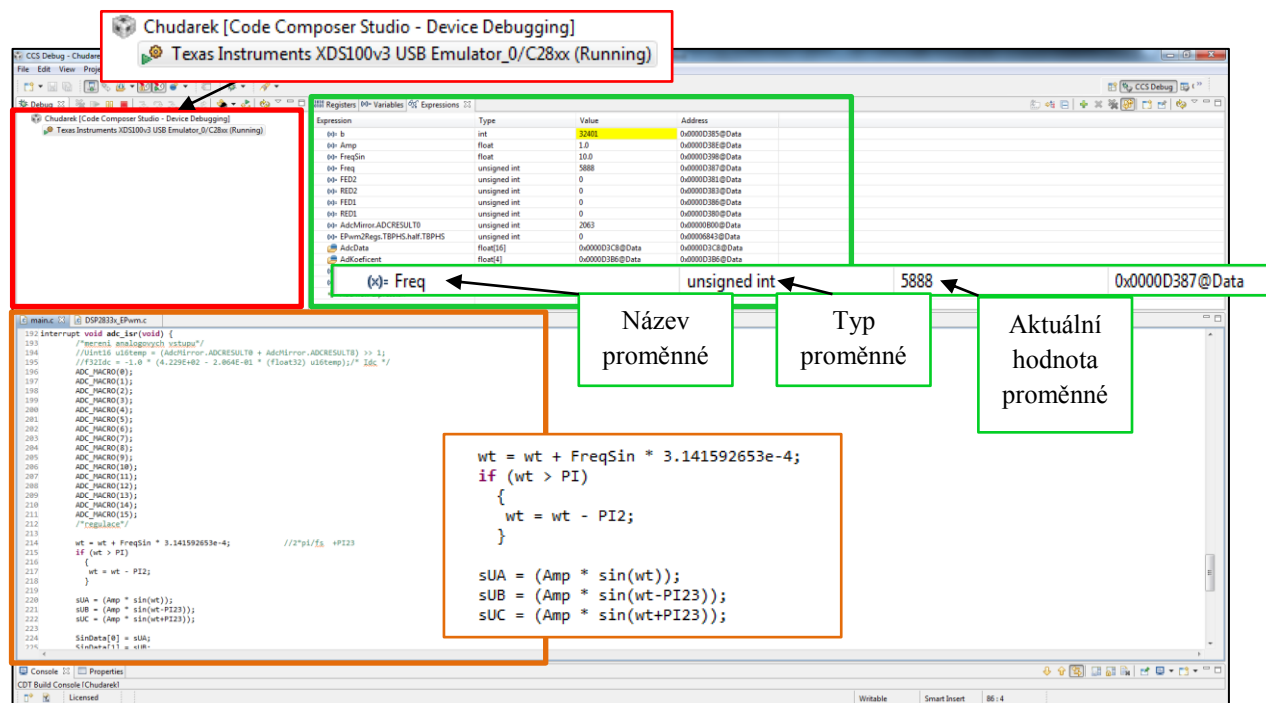


Obr. č. 6.1: Realizovaná část reverzibilního DC/DC měniče

6.1 Prostředí pro programování mikrokontroléru

Tak jako každý velký výrobce kontrolérů i Texas Instrument dodává vlastní prostředí pro tvorbu programu. Program se nazývá Code Composer Studio. Tento program uživateli poskytuje spolehlivý kompilátor pro psaní programu v jazyce C/C++. Obsahuje spoustu užitečných nástrojů, jako je krokování programu, zobrazování hodnot jednotlivých proměnných a real-time mód. Dále výrobce poskytuje velké množství knihoven přizpůsobených pro daný typ kontroléru. Podpora této

platformy ze strany výrobce je více než dostačující k tomu, aby uživatel byl schopen rychle realizovat potřebné úlohy. Pro názornou ukázkou je uveden obrázek, 6.2 na kterém je vidět prostředí pro odladění programu pro mikrokontrolér.



Obr. č. 6.2: Prostředí CCS

Na obrázku jsou zvýrazněny 4 oblasti, které zobrazují důležité oblasti programu.

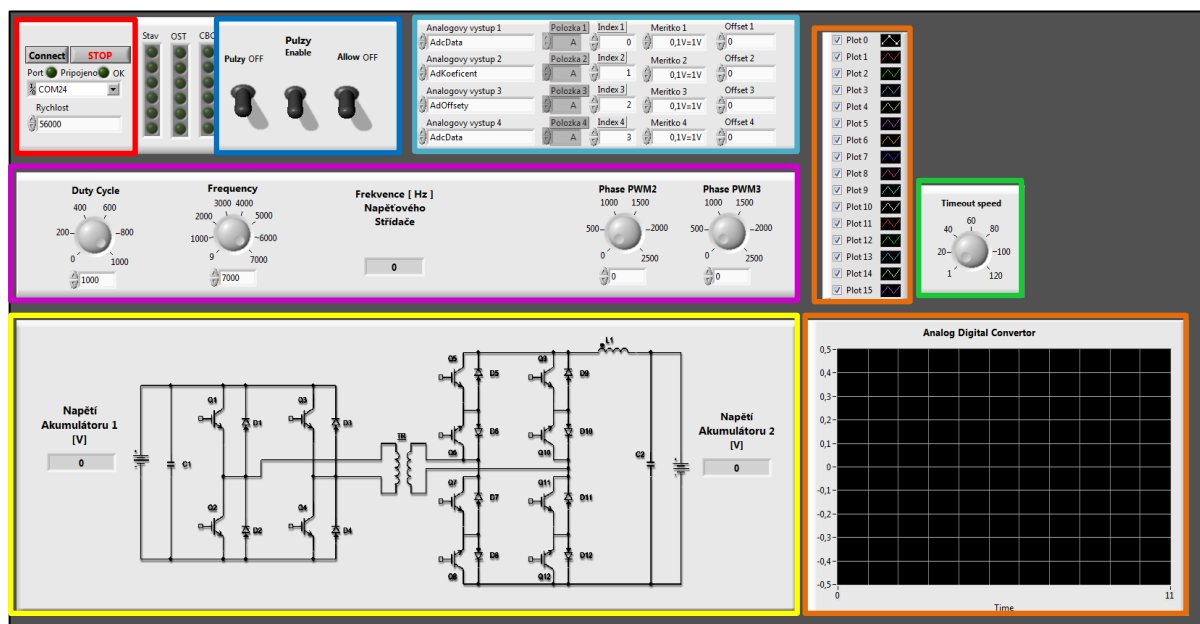
Červený rámeček – označuje typ komunikace s procesorem pro debugování kódu

Zelený rámeček – ukazuje na část prostředí, kde programátor může sledovat chování jednotlivých proměnných

Oranžový rámeček – je okno, jenž umožňuje programátorovi sledovat například krokování kódu

6.2 Nadřazený systém pro ovládání

Jako nadřazený systém pro ovládání a diagnostiku měniče je využito prostředí od firmy National Instruments. Program je známý pod názvem LabView a v dnešní době je velice často využíván zejména pro jeho rozsáhlé možnosti použití. LabView velice razantně zkracuje čas při navrhování prototypových zařízení díky svým obsáhlým knihovnám a intuitivnímu programování. Jak je vidět na obrázku 6.3 jsou vyznačeny oblasti jednotlivých částí prostředí pro ovládání a vyčítání dat z reverzibilního měniče.



Obr. č. 6.3: Nadřazené prostředí pro řízení reverzibilního měniče

- Červené orámování** – označuje oblast, ve které se nachází rolovací okna, určující port komunikace a rychlost komunikace
- Modré orámování** – obsahuje tři spínače se stabilní polohou, sloužící k blokování a aktivaci řídicích pulzů do budičů
- Fialové orámování** – znázorňuje nastavení parametrů řízení jako je frekvence, zatěživatel a nastavení zpoždění řídicích pulzů do maticového měniče
- Žluté orámování** – zobrazuje údaje o stavu měniče a připojených baterií
- Zelené orámování** – je nastavitelná hodnota periody, kdy mikrokontrolér komunikuje s nadřazeným systémem. Hodnoty jsou reprezentovány v milisekundách.
- Oranžové orámování** – reprezentuje oblast kde se nacházejí data z A/D převodníku, která jsou zobrazena do grafu
- Tyrkysové orámování** – stanovuje výběr proměnných, jenž se posílají na výstup D/A převodníku

6.3 Ověření funkčnosti algoritmu pro přenos energie A-B

Při ověřování algoritmu byl použit 4 kanálový osciloskop Rigol DS1074Z. Naměřené průběhy řídicích pulzů pro budiče jsou zachyceny na obrázku 6.4.

Nastavené parametry osciloskopu:

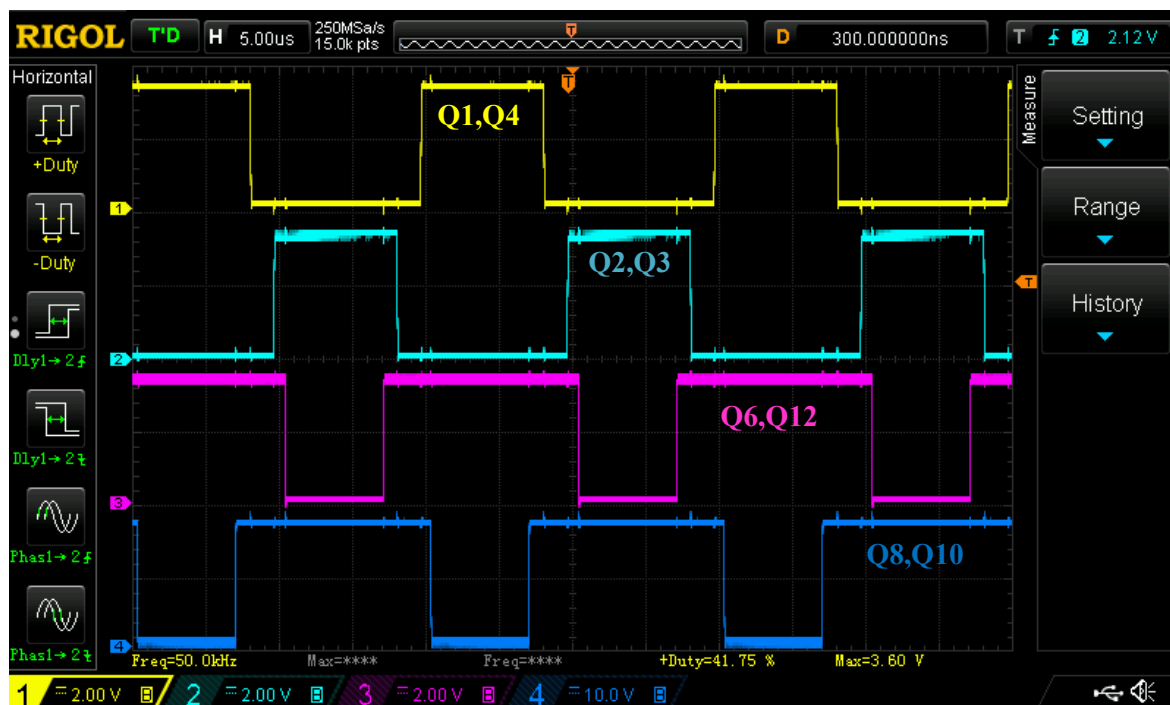
- Časová základna **5 μ s/Div**
- Y osa **2V/Div**

Nastavené parametry pro měnič

- Spínací frekvence **50 kHz**
- Zatěžovatel **0.41**

Indexy na průbězích korespondují s předchozími kapitolami. Pro stručné zopakování důležitých indexů a průběhů jsou uvedeny následující řádky:

1. **Žlutý průběh** – odpovídá řídicím pulzům pro tranzistor *Q1, Q4*
2. **Tyrkysový průběh** – odpovídá řídicím pulzům pro tranzistor *Q2, Q3*
3. **Růžový průběh** – odpovídá řídicím pulzům pro tranzistor *Q6, Q12*
4. **Modrý průběh** – odpovídá řídicím pulzům pro tranzistor *Q8, Q10*



Obr. č. 6.4: Ověření spínacího diagramu A-B

6.4 Ověření funkčnosti algoritmu pro přenos energie B-A

Při ověřování algoritmu byl použit 4 kanálový osciloskop Rigol DS1074Z. Naměřené průběhy řídicích pulzů pro budiče jsou zachyceny na obrázku 6.5.

Nastavení osciloskopu:

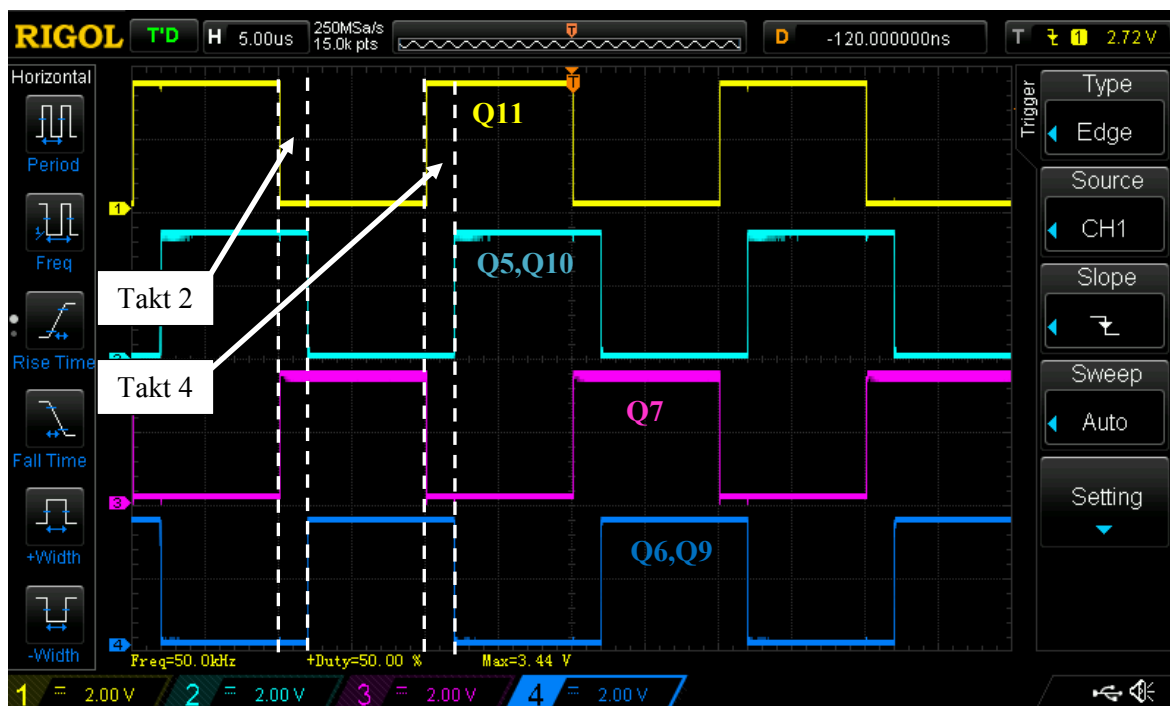
- Časová základna **5 μ s/Div**
- Y osa **2V/Div**

Nastavené parametry pro měnič:

- Frekvence spínání **50 kHz**

Indexy na průbězích korespondují s předchozími kapitolami. Pro stručné zopakování důležitých indexů a průběhů jsou uvedeny následující řádky.

1. **Žlutý průběh** – odpovídá řídicímu pulzu pro tranzistor *Q11*
2. **Tyrkysový průběh** – odpovídá řídicím pulzům pro tranzistor *Q5, Q10*
3. **Růžový průběh** – odpovídá řídicímu pulzu pro tranzistor *Q7*
4. **Modrý průběh** – odpovídá řídicím pulzům pro tranzistor *Q6, Q9*



Obr. č. 6.5: Ověření spínacího diagramu B-A

7. Závěr

Cílem diplomové práce bylo provést návrh řídicího systému pro reverzibilní DC/DC měnič s funkcí přečerpávání energie z akumulátorů. Úvodní kapitoly práce slouží k objasnění základní problematiky reverzibilních měničů a k uvedení jejich aplikace a základních rysů. Dílčím cílem bylo analyzovat a ověřit základní principy a funkce daného typu měniče pomocí realizovaných simulací. Analýza obousměrného měniče pomocí programu Orcad Pspice byla důležitá pro podložení základní myšlenky řízení. Znázorněné metody řízení by měly být v praxi využitelné, a to minimálně pro objasnění způsobů řízení dvou měničů, které jsou na sobě časově závislé.

Zvláštní pozornost je v práci věnována hlavně algoritmům řízení měniče pro jednotlivé způsoby přenosu energie. Algoritmy jsou v závěru práce ověřeny v podobě generování řídicích pulzů pomocí mikrokontroléru od firmy Texas Instrument. Průběhy, které jsou zobrazeny v poslední kapitole jsou zaměřeny pomocí 4 kanálového osciloskopu. Co se týká realizace měniče, z časových důvodů se povedla realizovat jen jeho část. Na této části bylo ověřeno řízení napětového střídače. Závěrem lze tedy říci, že tato diplomová práce může sloužit jako úvodní materiál pro daný typ měniče.

8. Literatura

- [1] CARBONE, Ed. by Rosario. *Energy storage in the emerging era of smart grids*. Rijeka: InTech, 2011. ISBN 978-953-3072-692.
- [2] KAVYA, Gunda, K. Muni Divya Sree VACHANA, A. SUMATHI a K. SUBRAMANIAN. Matlab/Simulink based closed loop operation of semi-dual active bridge DC-DC converter. 2014 International Conference on Science Engineering and Management Research (ICSEMR). IEEE, 2014,s.1-5.DOI:10.1109/ICSEMR.2014.7043595.
- [3] KRISMER, F., J. BIELA a J.W. KOLAR. A comparative evaluation of isolated bi-directional DC/DC converters with wide input and output voltage range. Fourtieth IAS Annual Meeting. Conference Record of the 2005 Industry Applications Conference, 2005. IEEE, 2005, s. 599-606. DOI: 10.1109/IAS.2005.1518368.
- [4] NOVÁK, Jaroslav. CSc. ELEKTRO odbornecasopisy. [online]. 4.3.2014 [cit. 2015-03-15]. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/elektro/casopis/tema/prostredky-pro-mikroprocesorove-rizeni-elektricky-pohonu-3-cast-dokonceni-12368>
- [5] BRANDŠTETTER, Pavel. Mikropočítačové řídicí systémy II: Učební texty pro kombinované a distanční studium Ostrava: VŠB Ostrava, 2010.
- [6] OLIVKA, Petr. Procesory CISC RISC: Studijní materiál pro předmět Architektury počítačů. Ostrava: VŠB Ostrava, 2010.
- [7] PECH, Jan. Programovatelné logické obvody. *fpga.sweb*. [online]. 8.2.2015 [cit. 2015-03-15]. Dostupné z: <http://fpga.sweb.cz/>
- [8] VONDRÁŠEK, František. *Výkonová elektronika-měniče s vnější komutací, svazek 2*. 1. vyd. Plzeň: ZČU Plzeň, 1994. ISBN 80-7082-137-x
- [9] VONDRÁŠEK, František. *Výkonová elektronika-měniče s vlastní komutací a bez komutace, svazek 3*. 1. vyd. Plzeň: ZČU Plzeň, 1998. ISBN 80-7082-485-9
- [10] PAVELEK, Tomáš. Modelování a simulace elektronických systémů: Část 1 Ostrava: VŠB Ostrava, 2006
- [11] YOUSPICE. A community for electronic design a simulation. [online]. [cit. 2015-03-15]. Dostupné z: <http://www.youspice.com/ys/orcadspice.3sp>
- [12] Texas Instruments. [online].1995-2015[cit.2015-03-18]. Dostupné z : <http://www.ti.com/product/tms320f28335>
- [13] Texas Instruments. Application Notes [online].1995-2015 [cit.2015-02-18]. Dostupné z: <http://www.ti.com/general/docs/lit/getliterature.tsp?baseLiteratureNumber=spraa88&fileType=pdf>